



Aalto-yliopisto  
Insinööritieteiden korkeakoulu  
Rakenne- ja rakennustuotantotekniikan laitos  
Georakentaminen

Harri Ruotsala

## **Syvästabilointi – Laadunvalvonta geofysikaalisilla reikämitausmenetelmillä ja mekaanisilla kairausmenetelmillä**

Pohjarakennuksen ja maamekaniikan syventymiskohteen diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 2.11.2011  
Valvoja: Professori Leena Korkiala-Tanttu  
Ohjaaja: Asko Aalto

AALTO-YLIOPISTO TEKNIIKAN KORKEAKOULUT PL 12100, 00076 Aalto <a href="http://www.aalto.fi">http://www.aalto.fi</a>		DIPLOMITYÖN TIIVISTELMÄ	
Tekijä: Harri Ruotsala			
Työn nimi: Syvästabilointi - Laadunvalvonta geofysikaalisilla reikämittausten menetelmillä ja mekaanisilla kairausmenetelmillä			
Korkeakoulu: Insinööritieteiden korkeakoulu			
Laitos: Rakenne- ja rakennustuotantotekniikka			
Professuuri: Pohjarakennus ja maamekaniikka		Koodi: Rak-50	
Työn valvoja: Professori Leena Korkiala-Tanttu			
Työn ohjaaja(t): Diplomi-insinööri Asko Aalto			
<p>           Syvästabilointi on yleinen paksuilla savikoilla käytettävä pohjanvahvistusmenetelmä. Suomessa ja muissa pohjoismaissa käytetään yleensä syvästabiloinnin kuivamenetelmää, jossa märkään ja pehmeään saveen tehdään pilareita sekoittamalla saveen kuivaa kalkkia ja sementtiä. Syvästabiloinnin laadun varmistamiseksi tehdään laadunvalvontaa, jossa laatua mitataan pilarirakenteen lujuuden ja homogeenisuuden perusteella. Laadunvalvonta on perinteisesti suoritettu kairausmenetelmillä kuten pilarikairaus, pilarisiipikairaus ja CPTU- kairaus. Kairakärjen puristaminen hyvin lujittuneisiin pilareihin voi olla vaikeaa ja kairakärki karkaa usein ulos pitkistä pilareista.         </p> <p>           Tässä työssä esiteltiin geofysikaalisia reikämittausten menetelmiä ja arvioitiin niiden soveltuvuutta laadunvalvontaan. Näistä menetelmistä valittiin valmis geofysikaalinen reikämittausten menetelmä ja laitteisto, jota kokeiltiin syvästabiloitujen pilareiden ominaisuuksien mittaamiseen.         </p> <p>           Geofysikaalisista reikämittausten menetelmistä arvioitiin laadunvalvontaan mahdollisesti soveltuviksi sähköiset, seismiset ja akustiset menetelmät. Muiden menetelmien apumenetelmänä, erityisesti tiheyden mittaamiseen, voidaan käyttää radiometrisiä mittauksia. Kaikkein hyödyllisimmiksi menetelmiksi laadunvalvonnassa arvioitiin seismiset ja akustiset menetelmät, joilla voidaan määrittää materiaalien lujuus- ja kimmo-ominaisuuksia.         </p> <p>           Tässä työssä kokeiltiin akustista kokoaaltomittauksia Full Waveform Sonic- tyyppisellä reikämittauslaitteella. Akustisella mittauksella yritettiin määrittää P- ja S- aaltojen nopeudet syvästabiloidun pilarin kimmo-ominaisuuksien arvioimiseksi. Lisäksi tehtiin tiheysmittaus radiometrisellä gamma-gamma- menetelmällä. Saatuja mittaustuloksia verrattiin samoista rei'istä myöhemmin tehtyihin pilarikairaustuloksiin.         </p> <p>           Akustisessa mittauksessa ei havaittu ollenkaan S- aaltoa. P- aalto havaittiin, mutta se kulki mittauksissa pilarin sijaan vain liejuisessa vedessä. Ainoa onnistunut P-aallon mittaus oli maareiässä. Tiheysmittaus onnistui hyvin, mutta tiheyden ja lujuusominaisuuksien välinen korrelaatio ei ollut kovin hyvä. Akustisia mittauksia voidaan mahdollisesti käyttää laadunvalvontaan mutta ei tässä työssä kokeillulla tavalla. Reikämittausten hyvä puoli on suhteellisen hyvä syvyysulottuvuus. Akustisten mittausten käyttö edellyttää laitetekniikan kehittämistä laadunvalvontatarkoitukseen sopivaksi. Erityisesti luotaimen ja pilarin seinämän kontaktin tulisi olla parempi. Tarkoitukseen saattaisi sopia myös laite, jossa on enemmän kuin kaksi vastaanotinta.         </p>			
Päivämäärä: 2.11.2011		Kieli: suomi	
		Sivumäärä: 65 + 31	
Avainsanat: syvästabilointi, kalkkisementtipilari, laadunvalvonta, geofysikaaliset reikämittausten menetelmät, akustinen kokoaaltomittaus, pilarikairaus			

AALTO UNIVERSITY SCHOOLS OF TECHNOLOGY PO Box 12100, FI-00076 AALTO <a href="http://www.aalto.fi">http://www.aalto.fi</a>		ABSTRACT OF THE MASTER'S THESIS	
Author: Harri Ruotsala			
Title: Deep Mixing – The Quality Control by Geophysical Down Hole Methods and Mechanical Drilling Methods			
School: School of Engineering			
Department: Structural Engineering and Building Technology			
Professorship: Soil Mechanics and Foundation Engineering		Code: Rak-50	
Supervisor: Professor Leena Korkiala-Tanttu			
Instructor(s): Master of Science Asko Aalto			
<p>           Deep mixing is a common Ground Improvement method for deep clay zones. Deep mixing method, where dry lime and cement is mixed with wet clay, is used in Finland and other Nordic countries. For the assurance of the quality of deep mixing, quality control is made by measuring the strength and homogeneity of the pile structure. Traditionally, quality control is done by drilling methods such as column penetration test, wing drilling for piles and CPTU- method. Penetrating into the well strengthened piles may be difficult, and often drill head directs away from the pile.         </p> <p>           In this work geophysical down hole methods were introduced and their applicability for quality control was evaluated. Of these methods, the existent geophysical down hole method and device were chosen and tried for the measuring of the properties of deep mixed piles.         </p> <p>           Of the geophysical down hole methods, electric, seismic and acoustic methods were evaluated as possibly suitable for the quality control purpose. The radiometric measurements can be used as aid for other methods, particularly for measuring density. The seismic and acoustic methods were evaluated as the most useful methods, because they can be used for defining the strength and elastic properties of the material.         </p> <p>           In this work the acoustic full waveform measurement was tested by using Full Waveform Sonic-down hole device. In acoustic measurement the purpose was to measure compression and shear wave velocities in deep mixed piles for the evaluation of the elastic properties of the pile material. In addition, the radiometric gamma-gamma method was tested for the density measurement of piles. The geophysical results were compared with the results of the column penetration drillings that were made in same holes afterwards.         </p> <p>           In acoustic measurements the shear wave was not found at all. The compression wave was found, but it was travelling only via silty water. The only successful measurement was made in the natural ground hole. The density measurement was successful, but the correlation between strength and density was not very good. The acoustic measurements can possibly be used in quality control, but not the way presented in this work. The advantage down hole methods have is a relatively good depth reach. Making use of acoustic methods requires further device development for the quality control purpose. Especially, the contact between the pile and the sounder should be better. The device with more than two receivers might also be worth trying.         </p>			
Date: 02.11.2011		Language: Finnish	
		Number of pages: 65 + 31	
Keywords: deep mixing, lime-cement column, quality control, geophysical down hole methods, acoustic full waveform sonic, column penetration test			

## Alkusanat

*Tämä diplomityö on tehty Helsingin kaupungin Geoteknisellä osastolla. Työssä pyrittiin kehittämään syvästabiloinnin lopputuloksen laadunvalvonnassa käytettäviä menetelmiä. Tarkoituksena oli selvittää voidaanko geofysikaalisilla reikämittausmenetelmillä täydentää tai korvata laadunvalvonnassa paljon käytettyjä kairausmenetelmiä.*

*Kiitän professori Leena Korkiala-Tanttua työni valvonnasta. Kiitän diplomi-insinööri Asko Aaltoa työni ohjauksesta sekä siihen liittyvistä kommenteista ja kannustuksesta. Erityisesti haluan kiittää Kalle Rantalaa, Pertti Kerästä, Jari Haatajaa ja Osmo Korhosta, joilta sain maastokokeen suorittamisessa tarpeellisia tietoja ja keskustelutukea. Erityisen suuret kiitokset maastokokeen toteuttamisesta ansaitsevat Ramboll Oy:n porauksesta ja kairauksesta vastaavat henkilöt sekä Suomen malmi Oy:n geofysikaalisista mittauksista vastaavat henkilöt. Suuren kiitoksen sujuvasta yhteistyöstä ansaitsevat myös Linnanpellon syvästabilointiprojektissa mukana olevat Skanska Oy:n työntekijät, jotka tarjosivat sopivan kohdan ja aikaikkunan maastokokeelle. Pauli Saksaa kiitän geofysikaalisiin menetelmiin liittyvistä neuvoista työni alkuvaiheessa. Helsingin kaupungin Geoteknisen osaston henkilökuntaa kiitän kannustuksesta työni aikana.*

*Puolisoani Mirjaa, tytärtäni Heiniä, Vanhempiani ja Appivanhempiani kiitän kaikesta saamastani tuesta.*

Espoossa 2.11.2011

Harri Ruotsala

## Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo .....	5
Merkinnät .....	7
Lyhenteet .....	9
1 Johdanto .....	10
2 Syvästabilointi .....	12
2.1 Menetelmän historia .....	12
2.2 Kuivamenetelmän periaate .....	12
2.3 Menetelmän toimivuus ja käyttökohteet .....	13
2.4 Menetelmän kustannukset .....	15
3 Stabiloidun saven ominaisuudet ja lujittuminen .....	17
3.1 Stabiloidun saven lujuus .....	17
3.2 Stabiloidun saven ominaisuuksiin vaikuttavat tekijät .....	19
3.3 Stabiloinnin lujittuminen .....	20
4 Laadunvalvonta .....	22
4.1 Yleistä laadunvalvonnasta .....	22
4.2 Ennakoiva laadunvalvonta .....	22
4.3 Menetelmän suorittamisen laadunvalvonta .....	22
4.4 Lopputuloksen laadunvalvonta .....	23
4.5 Yleistä laadunvalvontamenetelmistä .....	23
4.6 Laadunvalvontamenetelmien kehitys .....	23
5 Kairausmenetelmät ja pilarinäytteenotto syvästabiloinnin laadunvalvonnassa .....	24
5.1 Valmiin pilarin kairaus .....	24
5.2 Pilarikairaus .....	24
5.3 CPTU- kairaus .....	26
5.4 Pilarisiipikairaus .....	26
5.5 Näytteenotto ja koestaminen .....	27
5.6 Syvästabiloinnin laadunvalvonnan kustannukset .....	28
6 Geofysikaalisten menetelmien soveltuvuus syvästabiloinnin laadunvalvontaan .....	29
6.1 Geofysikaaliset mittausmenetelmät .....	29
6.2 Pilarin ominaisuuksien tutkiminen geofysikaalisilla menetelmillä .....	29
6.3 Mittaustapojen soveltuvuus syvästabiloidun pilarin havainnointiin .....	30
6.4 Geofysikaaliset reikämittaukset .....	31
6.5 Magneettiset reikämittaukset .....	33
6.6 Sähköiset reikämittaukset .....	33
6.7 Sähkömagneettiset reikämittaukset .....	36
6.8 Radiometriset reikämittaukset .....	41
6.9 Seismiset reikämittaukset .....	41
6.10 Akustiset reikämittaukset .....	44
6.11 Kahden menetelmän yhdistäminen .....	46
6.12 Arvio reikämittausmenetelmien soveltuvuudesta - menetelmän valinta .....	47
6.12.1 Magneettiset, sähköiset ja sähkömagneettiset menetelmät .....	47
6.12.2 Radiometriset, seismiset ja akustiset menetelmät .....	47
7 Kenttäkokeet/valittujen mittausmenetelmien kuvaus .....	49
7.1 Mittausten suunnittelu ja mittausmenetelmät .....	49
7.2 Linnanpellon esirakentamiskohde .....	49

7.3	Koekentän maaperäolosuhteet ja stabiloituvuus .....	50
7.4	Reiän poraaminen .....	51
7.5	Akustinen mittaus .....	51
7.6	Radiometrinen mittaus .....	53
7.7	Pilarikairaus .....	53
8	Kenttäkokeiden tulokset .....	54
9	Tulosten arviointi .....	57
10	Johtopäätökset .....	61
	Lähdeluettelo .....	62
	Liiteluettelo .....	65
	Liitteet	

## Merkinnät

A	[m <sup>2</sup> ]	pinta-ala
A <sub>v</sub>	[dB]	sähkömagneettisen aallon vaimeneminen väliaineessa
AM	[m]	virtanavan ja jännitenavan välinen etäisyys
AO	[m]	mittauspisteen ja lähimmän virtaelektrodin välinen etäisyys
E	[Pa]	kimmokerroin
E <sub>dyn</sub>	[Pa]	kimmokertoimen dynaaminen arvo
F	[N]	voima
F <sub>m</sub>	[N]	kappaleiden välinen vetovoima
G	[Pa]	leikkausmoduuli (= liukukerroin)
G <sub>e</sub>	[m <sup>3</sup> /(kgs <sup>2</sup> )]	yleinen painovoimavakio (= 6,67 × 10 <sup>-11</sup> )
I	[A]	virta
I <sub>s</sub>	[m]	sähkömagneettisen aallon aallonpituus
K	[Pa]	puristuskerroin
K <sub>s</sub>	[-]	sähkömagneettisen aallon heijastuskerroin rajapinnalla
M	[kg]	suuren kappaleen massa
N <sub>c</sub>	[-]	kokeellinen kantavuuskerroin
NM	[m]	jännitenapojen välinen etäisyys
P	[N]	kairausvastus
R	[m]	maapallon säde
R <sub>L</sub>	[-]	läpäisykerroin
R <sub>s</sub>	[V/A]	potentiaali jaettuna virralla
S	[m]	lähettimen ja vastaanottimen välinen etäisyys
T	[s]	seismisen aallon kokonaiskulkuaika
V	[V]	potentiaali
a	[m]	elektrodien välinen etäisyys
e	[-]	dielektrisyyden ja susceptibiliteetin yhteisvaikutus
c	[m/s]	valonnopeus tyhjiössä
cps	[-]	counts per second
f	[MHz]	taajuus
g	[m/s <sup>2</sup> ]	maan vetovoiman kiihtyvyys
m	[kg]	pienen kappaleen massa
r	[m]	kappaleiden massakeskipisteiden välinen etäisyys
r <sub>a</sub>	[m]	etäisyys virtanavasta
r <sub>e</sub>	[m]	maadoituselektrodin tehollinen säde
s	[m]	rajapinnan syvyys
t	[s]	sähkömagneettisen aallon kulkuaika väliaineessa
v	[m/s]	aallonnopeus
v <sub>p</sub>	[m/s]	pitkittäisen aaltoliikkeen nopeus
v <sub>s</sub>	[m/s]	poikittaisen aaltoliikkeen nopeus
λ	[m]	aallonpituus
σ <sub>p</sub>	[N/m <sup>2</sup> ]	pilarinäytteen puristuslujuus
σ <sub>0</sub> '	[Pa]	maan tehokas pystysuora jännitys
Δσ	[Pa]	jännityslisäys puristuskokeessa
Δε	[%]	suhteellinen muodonmuutos puristuskokeessa
τ <sub>p</sub>	[N/m <sup>2</sup> ]	pilarinäytteen leikkauslujuus
ν	[-]	Poissonin luku
ν <sub>dyn</sub>	[-]	Poissonin luvun dynaaminen arvo

$\mu$	[Pa]	liukukerroin (= leikkausmoduuli)
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	tiheys
$\rho_a$	[ $\Omega$ m]	näennäinen ominaisvastus
$\rho_s$	[ $\Omega$ m]	väliaineen ominaisvastus
$\omega$	[S/m]	sähkönjohtavuus



## Lyhenteet

ALT	Advanced Logic Technology
CH	Cross Hole
CPTU	Cone Penetration Test, Undrained
DH	Down Hole
FWS	Full Waveform Sonic (=akustinen kokoaaltomittaus)
HDPE	High Density Polyethylene
IP	Indusoitu Polarisaatio
P-aalto	Pitkittäinen aaltoliike (= puristusaalto)
PVC	PolyVinyl Chloride
S-aalto	Poikittainen aaltoliike (= leikkausaalto)
SGY	Suomen Geoteknillinen Yhdistys
SP	Self Potential (= Omapotentiaali)
SVT	Suomen Virallinen Tilasto
VLF	Very Low Frequency
VSP	Vertical Seismic Profiling (= Seisminen pystyprofilointi)

# 1 Johdanto

## Työn tausta

Syvästabiloinnin suorittaminen on suhteellisen yksinkertaista. Saatava laatu kuitenkin vaihtelee paljon, joten työn onnistumisen varmistamiseen tarvitaan laadunvalvontaa. Nykyisin käytössä oleviin laadunvalvontamenetelmiin liittyy yleensä kalliita ja aikaa vieviä työsuorituksia ja raskasta kalustoa. Yleinen ongelma laadunvalvonnassa on ollut, että mikään menetelmä ei anna luotettavaa kuvaa syvästabiloidun pilarin laadusta yli 10 metrin syvyydeltä. Geofysikaalisissa maan pinnalta suoritettavissa menetelmissä yleisinä ongelmina ovat olleet mittaustulosten yleisluontoisuus, epätarkkuus ja huono syvyyssulottavuus. Ongelmat johtuvat pääsääntöisesti saven ominaisuudesta vaimentaa tehokkaasti aaltoliikkeitä ja erilaisia impulsseja.

Nykyisin Suomessa yleisessä käytössä olevat menetelmät pilarikairaus ja puristin-heijarikairaus antavat jatkuvan kuvan syvästabiloidun pilarin puristuslujuudesta. Kairausmenetelmillä saadaan kuitenkin selville pilarin lujuus vain pieneltä osalta pilarin poikkileikkauksista. Suunnittelija tarvitsisi tiedon myös pilarin poikkileikkauksen homogeenisuudesta, jonka selvittämiseen nykyiset kairausmenetelmät soveltuvat huonosti. Pilari on usein epähomogeeninen ja todellisen lujuuden määrittäminen on parhaimmillaankin vain valistunutta arvaamista. Kairausmenetelmien tueksi tarvitaan täydentäviä, mahdollisesti geofysikaalisia menetelmiä, joilla pilarin homogeenisuudesta saadaan parempi kuva ja mitattujen lujuusarvojen luotettavuus paranee.

## Työn tavoitteet

Tässä työssä koottiin yhteen tietoja geofysikaalisista reikämittausmenetelmistä, jotka soveltuvat maastossa suoritettavaan syvästabiloinnin laadunvalvontaan valmiille, lujituneille pilareille. Työssä esiteltiin myös muita kuin geofysikaalisia laadunvalvontamenetelmiä siinä määrin kuin se menetelmien vertailun kannalta oli tarpeellista. Työssä selostettiin kunkin menetelmän hyvät ja huonot puolet sekä yleinen käyttökelpoisuus, jota voidaan arvioida suorittamisen helppouden, nopeuden, vaaditun laitteiston, ympäristöystävällisyyden, taloudellisuuden ja tarkkuuden perusteella. Yleisenä tavoitteena oli löytää menetelmä, jolla saadaan edulliseen hintaan luotettavaa ja riittävän tarkkaa tietoa stabiloidun pilarin lujuudesta ja tasalaatuisuudesta.

Työssä arvioitiin yleisesti erilaisten geofysikaalisten menetelmien soveltuvuutta syvästabiloinnin laadunvalvontaan. Työssä pyritään erityisesti parantamaan maastossa suoritettavan syvästabiloinnin laadunvalvonnan luotettavuutta, käyttökelpoisuutta ja taloudellisuutta.

Työn yhteydessä kokeiltiin geofysikaalisiin reikämittausmenetelmiin perustuvaa laadunvalvontamenetelmää, joka voisi soveltua syvästabiloitujen pilareiden lujuuden tai tasalaatuisuuden määrittämiseen. Työn yhteydessä etsittiin laadunvalvontaan soveltuva geofysikaalinen reikämittauslaite, jonka käyttökelpoisuutta kokeiltiin Suomen olosuhteissa. Menetelmän käyttökelpoisuuden todentamiseksi tehtiin maastokokeita valmiille pilareille. Maastokokeista saatuja tuloksia verrattiin nykyisellä Suomessa yleisessä käytössä olevalla laadunvalvontamenetelmällä saatuihin tuloksiin. Kokeilumittauksissa esiintyneet puutteet todennettiin ja arvioitiin kokeiltujen menetelmien rajoitteet sekä kehittämismahdollisuudet syvästabiloinnin laadunvalvonnassa. Jos kokeiden perusteella osoittautui, että menetelmä on laajamittaiseen käyttöön liian kallis, arvioitiin sen käyttömahdollisuuksia edullisempien laadunvalvontamenetelmien kalibroinnissa tai täydentävänä tiedonhankintakeinona.

### **Työn rakenne ja rajaukset**

Työssä esitellään syvästabilointimenetelmän historiaa, käyttökohteita, suoritustapaa, laadunvalvontaa ja kustannuksia sen verran kuin se menetelmän tarkoituksen ja koetilanteen ymmärtämiseksi sekä hintojen suhteuttamisen vuoksi on tarpeellista. Lisäksi työssä käsitellään suppeasti lujittuneen pilarin ominaisuuksia, jotka vaikuttavat geofysikaalisten menetelmien käyttökelpoisuuteen laadunvalvonnassa. Työssä kerrotaan yleisesti geofysikaalisten reikämittausmenetelmien toiminnasta ja käyttökohteista. Menetelmien esittelyn yhteydessä käsitellään lyhyesti niiden hyödyntämiseen tarvittavaa teoriaa. Lisäksi arvioidaan geofysikaalisten menetelmien soveltuvuutta syvästabiloitujen pilareiden laadun ja tasalaatuisuuden todentamiseen. Työn yhteydessä valitaan valmis geofysikaalinen menetelmä, jonka käyttöä kokeillaan pilarien lujuuden ja tasalaatuisuuden määrittämiseen Helsingin kaupungin alueella sijaitsevassa syvästabilointikohteessa.

Maastokokeen perusteella tehtävän vertailun vuoksi työssä esitellään lyhyesti yleisimmät Suomessa käytettävät laadunvalvontamenetelmät pilarisiipikairaus, pilarikairaus ja CPTU- kairaus ja pilarinäytteenotto. Kairausmenetelmistä kerättyjen hinta- ja soveltuvuustietojen perusteella voidaan arvioida geofysikaalisten menetelmien kannattavuutta. Geofysikaalinen laadunvalvontamenetelmä ei ole kannattava, jos se on huomattavasti kalliimpi kuin nykyiset kairausmenetelmät. Geofysikaalisen menetelmän hinta saa olla korkeampi, jos sillä saavutetaan tärkeää tietoa, jota kairauksilla ei saada.

Työssä esitetään koalueen maasto- ja maaperäolosuhteet, jotka on päätelty kairaustulosten, pohjavesimittausten ja maanäytteenottojen perusteella. Koalueen kuvauksessa on käytetty apuna myös olemassa olevien suunnitteluasiakirjojen ja aluetta koskevan rakennettavuusselvityksen tietoja. Lisäksi apuna on käytetty koalueella suoritettuja syvästabiloinnin ennakkokokeita.

Maastokokeen suoritukseen liittyvät laitteet, työvaiheet ja kokeiden suorittaminen kuvataan sanallisesti kuvia apuna käyttäen. Mittaustulokset esitetään kuvaajien ja taulukoiden avulla. Tulosten perusteella muodostetaan päätelmät ja johtopäätökset kokeiltujen menetelmien toimivuudesta ja käyttökelpoisuudesta.

## 2 Syvästabilointi

### 2.1 Menetelmän historia

Maailmalla syvästabiloinnin kuivamenetelmää on käytetty 1960- luvun lopulta lähtien. Suomessa menetelmän käyttö on aloitettu 1970- luvulla. Syvästabiloinnin kuivamenetelmää käytetään yleisesti savikoiden pohjanvahvistusmenetelmänä ehkäisemään painumia ja liukusortumia. Sopivia käyttökohteita ovat erityisesti 3...20 m paksut painumien ja stabiliteetin kannalta ongelmalliset savikerrostumat, joita pääkaupunkiseudulla ja Suomen etelärannikolla on runsaasti.

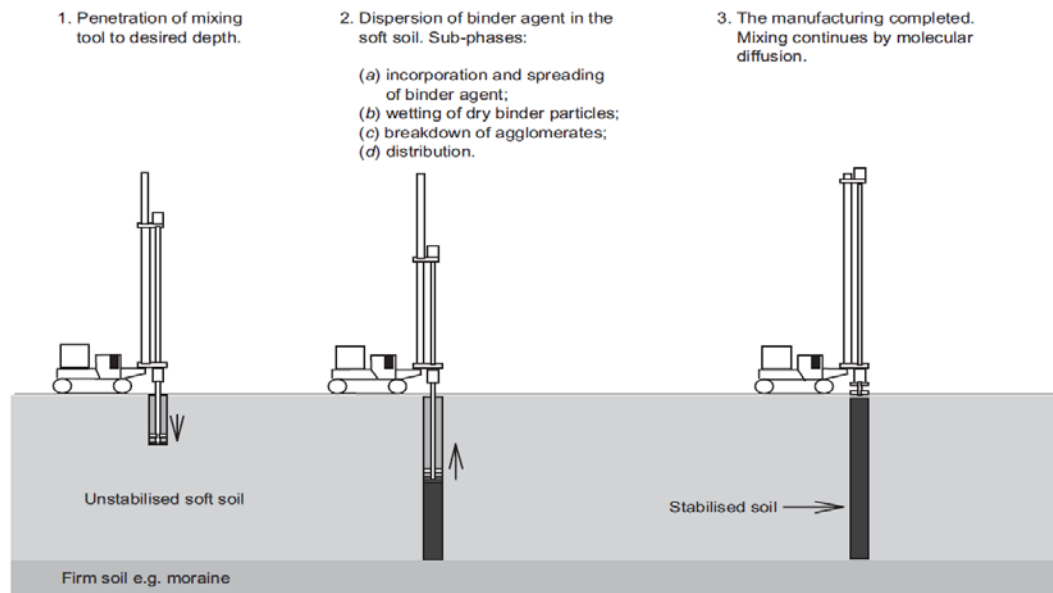
Edelläkävijämaita menetelmän käyttämisessä ja tutkimuksessa ovat Japani, Saksa ja Ruotsi. Erityisesti Ruotsista saadut syvästabilointiin liittyvät tutkimustulokset ja kokeilut ovat käyttökelpoisia Suomen kannalta, koska ilmasto ja maaperäolosuhteet ovat Suomessa ja Ruotsissa kohtuullisen lähellä toisiaan. Japanissa syvästabilointiin tarkoitettuja laitteistoja ja menetelmiä on kehitetty pitkälle. Japanissa maaperäolosuhteet ovat kuitenkin erilaiset kuin Suomessa, joten samanlaiset menetelmät eivät aina toimi. Lisäksi Japanissa syvästabiloinnin laite- ja menetelmäkehitys on keskittynyt erityisesti Suomen olosuhteisiin sopimattomaan märkämenetelmään.

### 2.2 Kuivamenetelmän periaate

Syvästabiloinnin kuivamenetelmässä saveen sekoitetaan sideainetta kuivana jauheena. Sideaineena käytetään yleensä kalkkia, sementtiä tai näiden seosta (Liikennevirasto 2010). Sideaineena voidaan käyttää myös laadultaan ja käyttökelpoisuudeltaan varmistettuja teollisuuden ylijäämämateriaaleja kuten masuunikuonaa. Märkämenetelmässä, joka Suomessa ei ole tällä hetkellä yleisessä käytössä, saveen tai hiekkaan sekoitetaan veden ja sideaineen seosta. Märkämenetelmää ei käytetä Suomessa, koska täällä tehdyt kokeilut eivät ole onnistuneet toivotulla tavalla.

Syvästabiloinnin suorittamisen aluksi stabilointilaitteen vispilämäinen kärkiosa painetaan savikerrosten läpi yleensä kovaan pohjamaahan saakka. Hitaamman ylösnoston aikana laitteen kärkiosassa sijaitsevien aukkojen kautta saveen syötetään kuivaa ja jauhemaista sideainetta paineilman avulla. Sekoitustangon nousunopeus pohjoismaissa käytetyillä laitteilla vaihtelee noin välillä 1,5–6,0 m/min. Sopiva nousunopeus riippuu maalajista sekä sideaineen määrästä ja tyypistä. Ylösnoston aikana vispilämäistä kärkikappaletta pyöritetään, jolloin sideaine sekoittuu saveen ja muodostuu mahdollisimman tasalaatuinen pilari. Kuvassa 1 on esitetty pilaroinnin suorittaminen vaiheittain syvästabiloinnin kuivamenetelmällä. (SFS-EN 14679 + AC 2005.)

Pilareiden alapään taso voi määräytyä ainakin kolmella eri tavalla. Pilarointi suoritetaan yleensä kantavaan syvästabiloinnin suorituksen aikana suhteellisen helposti havaittavaan pohjamaahan saakka. Tällöin pilarin tekeminen aloitetaan syvyydestä, johon käytettävä sekoitinkärki saadaan tunkeutumaan. Pilarit voidaan ulottaa myös kerrokseen, joka on riittävän kantava pilaroinnin pohjamaaksi, vaikka sekoitinkärjen työntäminen syvemmällekin esimerkiksi silttiin tai ylikonsolidoituneeseen saveen olisi mahdollista. Joskus suunnitellaan käytettäväksi määrämittäisiä pilareita, joiden alle jätetään painuva maakerros (Liikennevirasto 2010). Jos pilarointia ei uloteta kantavaan pohjamaahan saakka, tarvitaan tarkempia pohjatutkimuksia ja lisää laboratoriokokeita sekä suunnittelutyötä.



Kuva 1. Syvästabiloidun pilarin valmistaminen (Larsson, 2000).

Syvästabiloitujen pilarien halkaisija on yleensä 500–800 mm. Kun pilarin halkaisija on pieni, sekoitustyökalu tunkeutuu helpommin lujien kerrosten kuten kuivakuorisaven lävitse. Yleisimmin käytetty pilarihalkaisija on 600–700 mm (Liikennevirasto 2010). Yli 700 mm paksujen pilareiden tekemiseen tarkoitettuna sekoitustyökalun työntäminen maakerrosten läpi on selvästi hankalampaa ja ongelmat pilarin sekoittumisessa yleistyvät. Syvästabiloitujen pilarien maksimipituus Suomessa on yleensä noin 18–20 m. Uusimmilla laitteilla voidaan sekoittaa jopa 25 m pituisia pilareita. Pilarin pituutta rajoittaa syöttöletkun suurempi tukkeutumisriski suurilla pilaripituuksilla. Jos syöttö katkeaa stabiloinnin aikana, pilariin tulee epäjatkuvuuskohtia. Lisäksi pitkien pilarien alapää voi olla epäjatkuvuuskohtien vuoksi heikkolaatuista. Jos pitkillä pilareilla ei saavuteta riittävää laatua, pilarikenttä ei toimi suunnitellulla tavalla eikä pilarointi ole taloudellista.

Pilarin onnistumisen kannalta tärkeää on sideaineen tasainen syöttö, riittävän tehokas sekoitustyö ja tarvittavan ilmanpaineen minimointi (Liikennevirasto 2010). Riittävä ilmanpaine ehkäisee syöttöletkun tukkeutumisen, mutta liian kova paine aiheuttaa tarpeetonta saven häiriintymistä, ilmamäärän kasvua ja pilarin laadun heikkenemistä. Sekoituskärjen pyöritysnopeus, ylösnoston nopeus ja syöttöilman paine voidaan säätää tapauskohtaisesti optimaalisiksi syvästabiloitavan kohteen maaperäolosuhteiden mukaan. Syöttöilman painetta voi nykyisillä laitteilla säätää syvästabiloinnin aikana. Tämä tarjoaa mahdollisuuden tehdä pidemmistäkin pilareista tasalaatuisia. Pilarin alaosa stabiloitaessa tarvitaan suurempaa painetta, jotta syöttöletku ei tukkeudu. Ilmanpainetta on mahdollista pienentää vähitellen sekoituskärjen ylösnoston aikana, kun maanpaine pienenee. Vaikka säätötekniikka ja laitteisto antavat mahdollisuuksia ilmanpaineen ja sideainemäärän vaihteluihin, yleensä pilarit edelleen sekoitetaan samalla tavalla alhaalta ylös.

### 2.3 Menetelmän toimivuus ja käyttökohteet

Syvästabilointi on esirakentamismenetelmä, jolla pienennetään painumia ja parannetaan maan vakavuutta. Suomessa menetelmää on käytetty teiden, katujen, putkijohtolinjojen, tonttialueiden sekä puisto- ja ranta-alueiden pohjanvahvistukseen ja stabiliteetin parantamiseen (Parkkinen 1991). Syvästabiloinnin tarkoitus on parantaa maan leikkaus- ja puristuskestävyyttä. Yleensä tavoitteena on saada aikaan riittävän hyvin lujittunutta

maa-ainesta kustannustehokkaasti. Tarvittavan lujuuden määrittävät tyypillisesti käsiteltävän alueen käyttötarkoitus, stabiloidun rakenteen päälle tulevat kuormat ja lähellä sijaitsevat rakenteet kuten maaluiskat ja kaivannot.

Suomessa ei yleensä suositella syvästabilointia rakennusten perustamiseen. Syvästabiloinnilla voidaan perustaa keveitä kantavia rakenteita kuten alikulkukäytäviä, porttaali-perustuksia ja pumppaamoita (Liikennevirasto 2010). Syvästabiloinnin käyttäminen tien pohjanvahvistuksena vähentää liikenteen aiheuttamia tärinöitä. Tien suuntaisesti rakennettavilla syvästabilointiseinämillä voidaan vähentää ympäristöön leviävää tärinää. Lyhyillä määrämittaisilla pilareilla voidaan vähentää työkonien aiheuttamaa maapohjan häiriintymistä pehmeiköillä.

Suomessa menetelmän käyttö on edullista ja taloudellista lähinnä Etelä- ja Länsirannikolla, sillä siellä sijaitsevat menetelmän käytön kannalta oleelliset paksut ja pehmeät savikerrokset. Menetelmän suurimpia hyödyntäjiä ovat olleet Tielaitos sekä rannikon suuret kaupungit Helsinki, Vantaa, Espoo ja Turku. Yleinen käyttökohde on ollut katu- ja putkijohtolinjojen pohjanvahvistus. Nykyisin syvästabilointia käytetään paljon myös puisto- ja piha-alueiden painumien vähentämiseen. Suuri osa tällä hetkellä rakentamattomista alueista pääkaupunkiseudulla sijaitsee savialueella, mikä aiheuttaa syvästabiloinnin käytön yleistymistä edelleen.

Menetelmä on ennakkokokeista ja laadunvalvonnasta huolimatta virhealtis eikä eri muuttujien vaikutusta tunneta täydellisesti. Syvästabiloinnin käytön ja laadunvalvonnan parempi hallitseminen edellyttää lisää tutkimusta. Nykyisen tietämyksen mukaan menetelmä kuitenkin toimii yleensä riittävän hyvin savikoiden painumien ja stabiliteetin parantamiseen, joten sen käyttö on toiminnallisesti ja taloudellisesti järkevää.

Syvästabiloinnilla pehmeän saven lujuus saadaan pilarin kohdalta noin 5-15-kertaiseksi alkuperäiseen saven lujuuteen verrattuna (Liikennevirasto 2010). Koska pilarit kestävät selvästi paremmin puristusjännitystä kuin vetojännitystä, syvästabiloinnin puristuslujuutta parantava ja painumia ehkäisevä vaikutus on suurempi kuin stabiliteettia parantava ja maapohjan leikkautumista ehkäisevä vaikutus. Jännitykset jakautuvat pilareita ympäröivälle maalle ja pilareille. Jakautuminen riippuu maan ja pilarien muodonmuutosmoduulien suuruudesta. Syvästabiloinnin tavoitteena on yleensä että maa ja pilarit toimisivat yhtenä joustavana rakenteena. Koska pilarien varaan ei pääsääntöisesti saa suunnitella rakennuksia, yksittäisten pilareiden ei tarvitse kantaa suuria kuormia. Tällöin ei ole tarvetta todella lujien pilareiden käyttöön. Suunnittelussa oletetaan että syvästabilointi on maan lujittamismenetelmä, ei kantava rakenne.

Sivusuuntaista stabiliteetin parantamista tarvitaan yleensä kun penkereitä rakennetaan kaltevalle maapohjalle tai luiskien läheisyyteen. Yksittäisiä pilareita ei suositella luiskien ja kaivantojen vakavuuden parantamiseen (Liikennevirasto 2010). Tällaisissa kohteissa voidaan lisävarmuuden aikaansaamiseksi rakentaa pilarointi seinämäisinä rakenteina tai blokkeina, jolloin vierekkäiset pilarit tukeutuvat toisiinsa. Tasaiselle maalle rakennettavan penkereen pohjanvahvistukseen syvästabilointi sopii hyvin.

Jotta menetelmää voidaan käyttää, valmiiden pilarien ja maapohjan pitää kestää maan pinnalle tulevan rakenteen paino siten että maan painumat pysyvät sallituissa rajoissa ja alueen kokonaisstabiliteetti säilyy. Kun annettuihin painuma- ja stabiliteettitavoitteisiin ei suunnitelmien ja laskelmien perusteella päästä tai menetelmän käyttäminen ei ole taloudellista, pitää harkita jonkin toisen pohjanvahvistusmenetelmän käyttöä.

## 2.4 Menetelmän kustannukset

Merkittävin tekijä, joka vaikuttaa syvästabiloinnin kohdekohtaiseen hintaan on stabiloitavan pehmeikön paksuus. Stabiloitavan syvyyden kaksinkertaistuminen merkitsee lähes kaksinkertaisia kustannuksia. Syvästabiloinnin hinta määritetään yleensä pilarimetrimäärän ja metrihinnan perusteella. Hyvin pienissä kohteissa metrihinta on yleensä korkeampi kuin suurissa kohteissa. Kun pilaroinnin metrimäärä kasvaa yli 30000 m:n, metrihinta ei enää laske (Tiehallinto 2002).

Tiehallinnon julkaisun 19/2002 mukaan sideaineen osuus stabilointikustannuksista on noin 45–60 % (Tiehallinto 2002). Julkaisun Geokuti 96 (Junnila & Lehtonen 1996) mukaan sideaineen osuus stabilointikustannuksista on noin 40–60 %. Näiden lähteiden mukaan sideainekustannukset muodostavat karkeasti arvioituna noin puolet stabilointikustannuksista. Käytettävän sideaineen määrä on yleensä suoraan verrannollinen pilaroitavan metrimäärän kanssa. Vaikka joissain laitteissa on mahdollisuus säästää sideainetta syöttämällä eri maakerroksiin eri määrä sideainetta, mahdollisuutta ei juurikaan käytetä. Taulukon 1 ja taulukon 2 tietojen perusteella havaitaan että kustannukset kasvavat huomattavasti pilarihalkaisijan kasvaessa. Suuremman pilarihalkaisijan käyttäminen on teknisesti hankalampaa, mikä ilmenee huomattavasti korkeampina työ kustannuksina. Lisäksi sideainetta kuluu huomattavasti enemmän kun pilarin halkaisija kasvaa.

Taulukon 1 tiedot on poimittu Tiehallinnon julkaisusta 19/2002, joten kustannustietoja käytettäessä niiden voidaan olettaa olevan vuoden 2002 hintatasossa. Nykyisin rakennuskustannukset nousevat noin 3 % vuodessa (SVT 2011). Tällä kustannusten ko hoamisnopeudella hinnat olisivat nousseet vuoteen 2011 mennessä noin 30 %. Taulukossa 1 alin ja ylin hinta ovat viitteellisiä arvoja. Rajat on määritetty siten että alin hinta alittuu 10 %:ssa kohteista ja ylin hinta ylittyy 10 %:ssa kohteista. Taulukon 1 tiedot perustuvat kohteisiin, joissa sideainemäärä on ollut 80–150 kg/m<sup>3</sup>.

Jos halutaan käyttää taulukon 2 kustannustietoja, ne pitää ensin muuntaa euromääräisiksi ja huomioida että kustannukset ovat noin vuoden 1996 hintatasossa. Euron muunto kerroin markoiksi on 5,94573 ja vuoden 1996 hintatasosta rakennuskustannukset ovat nousseet noin 50 %. Kun vertaillaan Geokuti 96:n (Junnila & Lehtonen) ja Tiehallinnon julkaisun 19/2001 hintoja keskihintaiselle 600 mm pilarille, huomataan että kustannukset poikkeavat hieman toisistaan. Tiehallinnon julkaisun tietojen mukaan laskettuna keskihintainen 600 mm pilari maksaisi noin 11,1 €/pilarimetri. Geokuti 96 antaisi samantyyppiselle pilarille hinnaksi noin 8,9 €/pilarimetri. Tämän yksinkertaisen tarkastelun perusteella voisi päätellä että Geokuti 96 antaa noin 20 % alhaisempia kustannustietoja syvästabiloinnille kuin Tiehallinnon julkaisu 19/2002.

Kun käytetään vanhoja kustannustiedostoja ja suoritetaan indeksikorjauksia, ei saada välttämättä riittävän tarkkaa lopputulosta syvästabiloinnin nykyhintoja arvioitaessa. Vaikka syvästabiloinnin hinta nousee ajan kuluessa, eri työvaiheiden ja materiaalien hintojen väliset suhteet näyttäisivät säilyvän muuttumattomina pitemmälläkin aikavälillä. Molempien lähteiden mukaan sideaineen hinta näyttäisi vaihtelevan suhteellisen vähän eri kohteissa. Myös eri sideaineiden väliset hintaerot ovat pieniä. Työn hinnan vaihtelu kohteiden välillä on huomattavaa, koska maasto-olosuhteiden välillä on suuria eroja. Vaikeissa olosuhteissa työn suorittaminen on usein hitaampaa ja teknisesti vaativampaa. Lisäksi syvästabiloinnin hintaa voivat nostaa erikoiskalusto ja työn kuluessa ilme nevät odottamattomat hankaluudet.

Taulukko 1. Syvästabiloinnin kustannusten muodostuminen (Tiehallinto 2002).

Pilarin koko [mm]	alin hinta [€/m]	ylin hinta [€/m]	Eritellyt kustan- nukset	alin hinta	ylin hinta
500	5,5	8,7	Koneen tuominen	1 400 €	3 000 €
600	5,9	11,2	Kalkki	0,15 €/kg	0,19 €/kg
700	7,6	16	Sementti	0,14 €/kg	0,17 €/kg
800	9,8	20,5	Kalkki-sementti	0,15 €/kg	0,19 €/kg
			Muut sideaineet	0,13 €/kg	0,19 €/kg
			työ, 500mm pilari	2,2 €/m	3,3 €/m
			työ, 600mm pilari	2,6 €/m	3,7 €/m
			työ, 700mm pilari	3,0 €/m	5,5 €/m
			työ, 800mm pilari	4,4 €/m	7,4 €/m

Taulukko 2. Syvästabiloinnin kustannustietoja (Junnila &amp; Lehtonen 1996).

Syvästabilointityön osat	yksikkö	helpot kohteet	vaativat kohteet	eritt. vaativat
Syvästabilointi 500 mm puolikovilla pilareilla	m	22	28	36
Syvästabilointi 600 mm puolikovilla pilareilla	m	27	34	44
Syvästabilointi 700 mm puolikovilla pilareilla	m	33	42	54
Syvästabilointi 800 mm puolikovilla pilareilla	m	50	60	70
- työn aloitus ja lopetus	kohde	8000	12000	16000
- kalkki	kg	0,5	0,6	0,7
- sementti	kg	0,4	0,5	0,6
- kalkkisementti	kg	0,5	0,6	0,7
- muut sideaineet	kg	0,35	0,5	0,7
- pilarointityö 500 mm pilareilla	m	12	14	18
- pilarointityö 600 mm pilareilla	m	14	16	20
- pilarointityö 700 mm pilareilla	m	16	24	30
- pilarointityö 800 mm pilareilla	m	24	30	40



### 3 Stabiloidun saven ominaisuudet ja lujittuminen

#### 3.1 Stabiloidun saven lujuus

Kun stabiloitu rakenne oletetaan lineaariseksi ideaaliplastiseksi materiaaliksi, sen muodonmuutosominaisuuksia voidaan arvioida soveltamalla Hookeen lakia ja lujuusominaisuuksia Mohr-Coulombin murtoehdolla. Hookeen lain perusteella voidaan määrittää erilaisia kimmovakioita, jännityksiä ja niiden välisiä riippuvuuksia. Yleisimmät syvästabiloidun rakenteen ominaisuuksia kuvaavat parametrit ovat pilarin leikkauslujuus, puristuslujuus ja kimmokerroin. Parametrien väliset yhteydet on esitetty yhtälöiden 1 – 3 avulla. Yhtälössä 1 esitetty puristuslujuus voidaan määrittää koekappaleelle laboratoriossa yksi- tai kolmiaksisiaalisella puristuskokeella. Yhtälössä 2 on esitetty yksinkertainen leikkauslujuuden ja puristuslujuuden välinen yhteys, jota käytetään leikkauslujuuden arviointiin, kun puristuslujuus tunnetaan. Yhtälön 2 mukaan leikkauslujuus on noin puolet puristuslujuudesta. Yhtälössä 3 puolestaan on esitetty kuinka kimmokerroin saadaan laskettua, kun tunnetaan jännityslisäys ja suhteellinen muodonmuutos. Kimmokerroin syvästabiloidulle näytekökappaleelle voidaan määrittää puristuskokeen jännitysmuodonmuutoskäyrän avulla. (Lahtinen 1995.)

$$\sigma_P = \frac{F}{A} \quad (1)$$

missä  $\sigma_p$  on pilarinäytteen puristuslujuus [Pa]  
 $F$  on näytekökappaleen rikkomiseen tarvittava voima [N]  
 $A$  on koekappaleen pinta-ala [m<sup>2</sup>]

$$\tau_P = \frac{\sigma_p}{2} \quad (2)$$

missä  $\tau_p$  on pilarinäytteen leikkauslujuus [Pa]

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (3)$$

missä  $E$  on kimmokerroin [Pa]  
 $\Delta\sigma$  on jännityslisäys [Pa]  
 $\Delta\varepsilon$  on koekappaleen suhteellinen muodonmuutos puristuskokeessa [%]

Ruotsalaisten tekemissä tutkimuksissa (Åhnberg et al. 1995) syvästabiloidulle saviselle liejulle ja savelle on määritetty kokeelliset yhtälöt 4-6, joilla syvästabiloidun pilarin kimmokerroin voidaan arvioida puristuslujuuden perusteella. Yhtälöitä 4 ja 5 voidaan käyttää savelle ja yhtälöä 6 saviselle liejulle. Yhtälöiden 4-6 perusteella syvästabiloidun rakenteen kimmokertoimen suuruus on suoraan verrannollinen puristuslujuuteen.

$$E = 50 \times \sigma_p, \text{ kun } \sigma_p < 300 \text{ kPa} \quad (4)$$

$$E = 120 \times \sigma_p - 175, \text{ kun } \sigma_p > 300 \text{ kPa} \quad (5)$$

$$E = 70 \times \sigma_p \quad (6)$$

Vanhemmissa ruotsalaisten tekemissä tutkimuksissa kimmokertoimen ja leikkauslujuuden välille on saatu yhtälössä 7 esitetty riippuvuus (Lahtinen 1995). Esimerkiksi Tiehallinnon kohteissa yli 3 m penkereille syvästabiloinnin keskimääräinen leikkauslujuustavoite on 120–200 kPa (Liikennevirasto 2010), mikä vastaa yhtälön 2 perusteella

puristuslujuuden arvoa 240–400 kPa. Kun oletetaan stabiloidun saven puristuslujuudeksi 400 kPa, yhtälöllä 5 saadaan kimmokertoimen arvoksi 47,8 MPa. Vastaavasti yhtälöllä 7 saadaan kimmokertoimen arvoksi 50 MPa, kun 200 kPa leikkauslujuutta vastaava puristuslujuus yhtälön 2 mukaisesti on 400 kPa. Yhtälöillä 5 ja 7 saadaan lähes sama tulos kun puristuslujuus on 400 kPa, joka on Tiehallinnon kohteiden suuntaa-antavan keskimääräisen lujuusvaatimuksen yläraja. Tätä lujempien pilareiden tekeminen tai vaatiminen ei yleensä ole tarkoituksenmukaista eikä taloudellisesti järkevää.

$$E = 250 \times \tau_p \quad (7)$$

Kimmokertoimen avulla voidaan Hooken lain perusteella määritellä myös muita kimmovakioita kuten leikkausmoduuli. Leikkausmoduulin ja kimmokertoimen yhteys on esitetty yhtälössä 8 (Richart et al. 1970). Yhtälössä 8 esiintyvä Poissonin luku on kimmovakio, joka kuvaa materiaalin kokoonpuristuvuutta. Poissonin luku todellisilla materiaaleilla on välillä  $0 \leq \nu \leq 0,5$ . Kun  $\nu$  on 0, materiaali on kokoonpuristumatonta. Kun  $\nu$  on 0,5 materiaali on täysin kokoonpuristuvaa. Ruotsalaisen Axelssonin (Axelsson 2001) tekemissä tutkimuksissa on käytetty syvästabiloiduille pilareille useisiin aikaisempiin mittauksiin perustuen Poissonin luvulle arvoa 0,34. Arvon perusteella voisi olettaa, että syvästabiloitu materiaali on hiukan lähempänä täysin kokoonpuristuvaa materiaalia kuin täysin kokoonpuristuvaa. Taulukon 3 mukaan esimerkiksi hiekkakivellä on sama Poissonin luku kuin syvästabiloidulla materiaalilla. Yhtälöissä 8 ja 9 esiintyvä leikkausmoduuli tarkoittaa leikkausjännityksen suhdetta leikkaussiirtymään. Leikkausmoduulista käytetään myös nimitystä liukukerroin.

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (8)$$

missä  $G$  on leikkausmoduuli eli liukukerroin [Pa]  
 $\nu$  on Poissonin luku [-]

*Taulukko 3. Eri aineiden kimmovakioita (Peltoniemi 1988).*

Aine	Kimmo- kerroin E (GPa)	Poissonin luku $\sigma$	Puristus- kerroin K (GPa)	Liuku- kerroin $\mu$ (GPa)
peridotiitti	95			
gabro	95-125	0,38		
graniitti	40- 77	0,11-0,30	30	20
rapakivigraniitti	53- 57			
dioriitti	72			
kalkkikivi	54	0,25		
kiilleliuske	84			
kvartsiitti	70- 85	0,13		
gneissi	60- 81	0,23	37	27
talkkiliuske	34			
amfiboliitti	113	0,30		
diabaasi	115	0,26		
hiekkakivi	16	0,34		
vesi		0,50	2,1	0
teräs	200	0,28	130	80
alumiini	70	0,30		26

Myös puristuskerrointa käytetään materiaalien lujuusominaisuuksien kuvaamiseen ja sillä on hyödyllisiä yhteyksiä muihin kimmovakioihin. Puristuskerrointa kutsutaan myös tilavuusmoduuliksi. Puristuskertoimen ja leikkausmoduulin yhteys Poissonin lukuun on esitetty yhtälössä 9.

$$\nu = (3K - 2G)/(6K + 2G) \quad (9)$$

missä  $K$  on puristuskerroin eli tilavuusmoduuli [Pa]

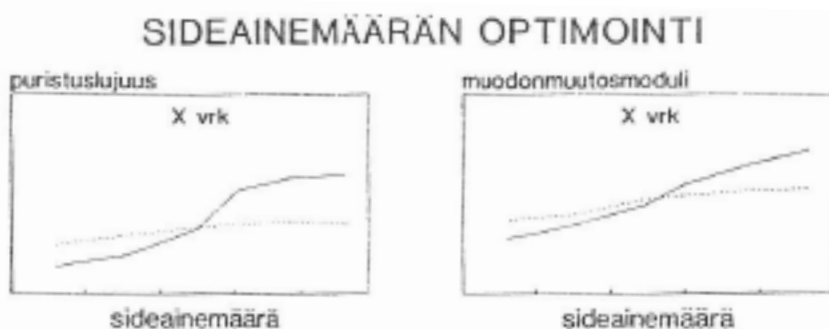
### **3.2 Stabiloidun saven ominaisuuksiin vaikuttavat tekijät**

Stabiloidun rakenteen lujuuteen vaikuttavat mm. käsiteltävän maalajin ominaisuudet, sekoitusolosuhteet, sekoitustyökalu, sekoitusmenetelmä, lujittumisolosuhteet, sideaineen tyyppi, sideaineen määrä ja pohjaolosuhteet (SFS-EN 14679 + AC 2005). Kaikki tekijät vaikuttavat osaltaan pilarin lujuudenkehitykseen ja lopulliseen lujuuteen. Yksikin epäsuotuisa tekijä voi vaikuttaa siten että stabilointi epäonnistuu. Aina ei edes löydetä selvää yksittäistä syytä stabiloinnin epäonnistumiseen.

Syvästabiloinnin onnistuminen riippuu suuresti alkuperäisen maaperän ominaisuuksista kuten saven tiheydestä ja vesipitoisuudesta. Saven tiheys on tyypillisesti 1,2–2,0 kg/m<sup>3</sup> ja vesipitoisuus 40–140 %. Saven tiheys ja vesipitoisuus muuttuvat hyvin vähän stabiloinnin seurauksena. Tiheys voi sekoittamisen seurauksena jopa pienentyä (Åhnberg et al. 1995), vaikka lujuus kasvaa. Tiheyden muutoksen perusteella ei voi tehdä päätelmiä stabiloinnin lujuudesta. Saven alkuperäisen tiheyden ja lopullisen lujuuden välillä saattaa kuitenkin olla yhteys. Suuri tiheys yleensä kertoo suuresta lujuudesta, toisaalta tiheäkin materiaali voi olla haurasta ja huonosti puristusta kestävä.

Syvästabiloinnin suunnittelussa pyritään löytämään kunkin kohteen olosuhteisiin sopiva sekoitusmenetelmä ja stabilointiresepti. Suunnittelussa pyritään huomioimaan kaikki stabilointiin epäsuotuisasti vaikuttavat tekijät ja minimoimaan niiden vaikutus stabiloinnin lujuuteen ja homogeenisuuteen. Suunnittelun onnistuminen tarvitsee tuekseen näytteenottoa, koepilarointia, kairauksia ja laboratoriokokeita. Jos todetaan, että syvästabilointimenetelmällä käsiteltäväksi suunnitellulla alueella ei ole mahdollista saavuttaa kohteen käyttötarkoituksen edellyttämää lujuutta, täytyy käyttää jotain vaihtoehtoisia esirakentamismenetelmiä kuten paalulaattaa tai pystyjoitusta. (Lahtinen 1995.)

Sekoituslaitteisto ja menetelmä ovat nykyisin kaikissa kohteissa urakoitsijasta riippumatta samantyyppisiä. Oikealla sekoittamisella vähennetään ilmamäärää ja varmistetaan riittävä saven ja sideaineen sekoittuminen. Oikean sideaineseoksen ja sideainemäärän valinta on suurin yksittäinen stabiloidun rakenteen lujuuteen vaikuttava tekijä. Kuvassa 2 on esitetty lujuuden kasvu, kun sideainemäärää kasvatetaan. Tietyllä raja-arvolla sideainemäärän kasvattaminen ei enää kasvata lujuutta. Stabilointikustannusten pienentämiseksi sideainemäärä kannattaa optimoida. (Lahtinen 1995.)



Kuva 2. Sideainemäärän vaikutus lujuuteen (Lahtinen 1995).

Sideaineena syvästabiloinnin kuivamenetelmässä käytetään yleisimmin kalkin ja sementin seosta tai pelkkää sementtiä (SFS-EN 14679 + AC 2005). Kun sideaine sisältää useampaa kuin yhtä stabiloivaa ainetta, sitä voidaan kutsua seossideaineeksi (Liikennevirasto 2010). Parhaiten sopiva sideaine tai sideaineseos riippuu käsiteltävän maalajin ominaisuuksista. Taulukossa 4 on esitetty suuntaa antavasti kullekin maalajille parhaiten sopiva sideaine. Syvästabilointimenetelmän yleinen ongelma on maalajin vaihtelu syvyys suunnassa. Eri kerroksiin pitäisi parhaan tuloksen saamiseksi käyttää erilaista stabilointireseptiä, mikä on teknisesti haastavaa mutta mahdollista.

Sideaineen sopivuus riippuu maa-ainestyyppin lisäksi lukuisista erilaisista parametreista, joten kairauksien ja näytteenottojen lisäksi suunnittelun yhteydessä pitää aina tehdä laboratoriokokeita sideaineen ja kunkin kohteen maalajityypin yhteensopivuuden varmistamiseksi. Kun stabiloidaan erittäin paljon orgaanista ainesta sisältävää tai erittäin vesipitoista maa-ainesta, voidaan käyttää erityisvalmisteisia sideaineita paremman lopputuloksen saamiseksi. Joskus kohteen käyttötarkoituksen kannalta on edullista tehdä lujuu-deltaan tavanomaista heikompaa stabilointia käyttämällä esimerkiksi sementin kanssa seosaineina lentotuhkaa tai kipsiä.

Taulukko 4. Sideaineen ja maa-aineksen yhteensopivuus (SFS-EN 14679 + AC 2005).

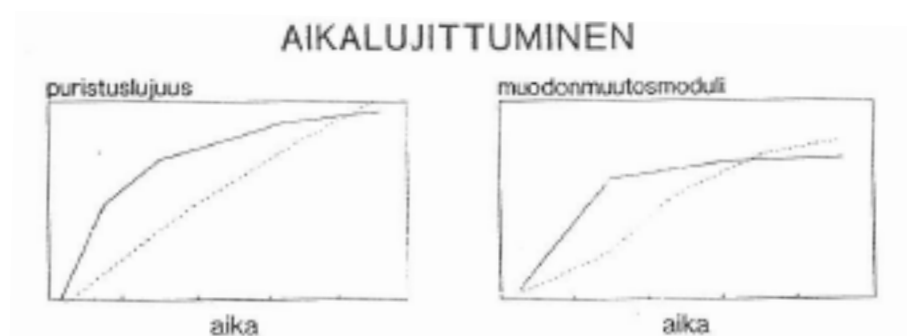
Maa-ainestyyppi	Sopiva sideaine
Savi	Kalkki tai kalkki-sementti
Erittäin sensitiivinen savi	Kalkki tai kalkki-sementti
Orgaaninen savi ja lieju	Kalkki-sementti tai sementti-masuunikuona tai kalkki-kipsi
Turve	Sementti tai sementti-masuunikuona tai kalkki-kipsi-sementti
Sulfiittimaa	Sementti tai sementti-masuunikuona
Siltti	Kalkki-sementti tai sementti

### 3.3 Stabiloinnin lujittuminen

Yksinkertaistetusti kalkki-sementillä stabiloidun saven lujittuminen riippuu sideainemäärän ja sideaineen laadun sekä sekoituskaluston ja sekoitustyön lisäksi ajasta ja lujittumisolosuhteista. Maaperän lujittumisolosuhteilla tarkoitetaan maaperän kemiallisia ja fysikaalisia ominaisuuksia. Syvästabiloinnin lujuutta voivat heikentää sideaineen sitoutumisreaktioiden kannalta haitalliset aineet ja olosuhteet. Tärkeimmät kemialliset ominaisuudet ovat sulfidipitoisuus ja humuspitoisuus, jotka voivat korkeina pitoisuuksina yksinäänkin johtaa stabiloinnin epäonnistumiseen. Myös alhainen pH voi aiheuttaa

alhaisia puristuslujuuksia. Erityisesti saastuneilla mailla esiintyy syvästabiloinnin lujuu-  
denkehitystä haittaavia aineita. (Juvankoski et al. 2007.)

Fysikaalisista ominaisuuksista merkittävimmät ovat maaperän vesipitoisuus ja lämpötila. Lujittumiseen vaikuttavat myös käsiteltävän maan leikkauslujuus, sensitiivisyys, kationin vaihtokapasiteetti ja johtokyky. Sideainereaktioiden tapahtuminen edellyttää alkuperäisen maan riittävää vesipitoisuutta. Optimi vesipitoisuus on yleensä välillä 50–100 %. Maaperän lämpötila vaihtelee puolestaan hyvin vähän. Maaperän lämpötila yli 2 m syvyydellä, jossa syvästabilointia suoritetaan, on keskimäärin noin 5-10 °C. Laboratorio-olosuhteissa näytekappaleet pitäisi säilyttää viileässä 8 °C lämpötilassa, jotta saadaan todellista tilannetta vastaavia tuloksia. Yleensä stabiloinnin lujuudesta vähintään puolet tapahtuu noin 30 vuorokauden kuluessa. Toisinaan yli puolet lujittumisesta tapahtuu aikavälillä 30–90 vuorokautta. Tämän vuoksi stabilointinäytteet koestetaan yleensä noin ajankohdilla 30 ja 90 vuorokautta. Kuvasta 3 nähdään että lujuudenkehitys on nopeinta alkuvaiheessa heti alkureaktioiden tapahduttua, jonka jälkeen lujuus kehittyy pitkään mutta hitaasti. (Lahtinen 1995, Juvankoski et al. 2007.)



Kuva 3. Stabiloidun saven lujuuden kehittyminen ajan funktiona (Lahtinen 1995).

## 4 Laadunvalvonta

### 4.1 Yleistä laadunvalvonnasta

Syvästabiloinnin laadunvalvonta tarkoittaa syvästabiloinnin ennakkokokeita sekä menetelmän suorittamisen ja lopputuloksen valvontaa. Laadunvalvontaketjulla varmistetaan, että syvästabilointityön lopputulos täyttää rakenteelta vaaditut tavoitteet. Ennakoivassa laadunvalvonnassa varmistetaan että syvästabiloinnilla on mahdollista tehdä tarpeeksi lujia pilareita suunniteltavassa kohteessa. Työnaikaisessa laadunvalvonnassa tarkkailaan käytettävän sideaineen laatua ja määrää sekä stabilointityön suorittamista. Lopputuloksen laadunvalvonnassa kiinnitetään huomiota lopullisen rakenteen ominaisuuksiin, valmiin pilarin sijaintiin, lujuuteen ja homogeenisuuteen.

### 4.2 Ennakoiva laadunvalvonta

Syvästabilointiprojektin suunnittelun alkuvaiheessa tehdään yleensä ennakoivaa laadunvalvontaa. Vaikka ennakoiva laadunvalvonta on syvästabilointiprojektin kannalta tärkeä vaihe, tässä työssä sitä käsitellään vain suppeasti. Ennakoivassa laadunvalvonnassa syvästabiloinnin soveltuminen tulevaan kohteeseen voidaan kokeilla ja varmistaa laboratoriokokeiden ja koepilareiden avulla. Tulevasta maastokohteesta otetaan maanäytteitä, joille tehdään koestabilointi laboratorio-olosuhteissa. Laboratoriokokeilla saadaan suuntaa antavasti määritettyä mm. sopivin sideaine, sideainemäärä, sekoitinkärjen nostonopeus ja lujittumisnopeus (Liikennevirasto 2010).

Stabiloidut koekappaleet koestetaan lujittumisen jälkeen puristuskokeilla laboratorio-olosuhteissa. Puristuskokeella mitataan maksimi puristusjännitys, jonka avulla voidaan laskea leikkauslujuus ja muodonmuutosmoduuli. Saavutetun puristuslujuuden ja muodonmuutosmoduulin perusteella arvioidaan kunkin koekappaleen onnistumista. Usein laboratoriokokeiden tulosten perusteella valitaan 2-4 lupaavinta stabilointitapaa koepilaintia varten. Tulevaan maastokohteeseen suunnitellaan ja sekoitetaan pilareita, joissa on käytetty erilaisia sideaineita ja sideainepitoisuuksia. Lisäksi voidaan kokeilla erilaisen sekoitustekniikoiden soveltuvuutta. Laboratoriossa sekoitettujen näytekappaleiden avulla saatuihin tuloksiin pitää suhtautua varauksella, koska sekoittaminen laboratoriossa onnistuu paremmin kuin kentällä, oikeassa työkohteessa.

Liikenneviraston Syvästabiloinnin suunnitteluohjeessa (Liikennevirasto 2010) suositellaan maastossa tehtävien koepilarien koestamista useammalla eri menetelmällä. Lisäksi Liikenneviraston suunnitteluohje kehottaa käyttämään koestusmenetelmänä pilarikairasta, jos käytetään vain yhtä menetelmää. Jotta koepilareista saadaan tulkittua tilastollisesti luotettavia tuloksia, kannattaa samalla tavalla koestaa vähintään 4 samalla tavalla stabiloitua pilaria. Laboratoriokokeissa minimi on kolme samalla tavalla stabiloitua koekappaletta.

### 4.3 Menetelmän suorittamisen laadunvalvonta

Urakoitsijan pitää dokumentoida suorittamansa syvästabilointi siten että voidaan nähdä toteutuiko työ suunnitelma-asiakirjoissa sovitulla tavalla. Syvästabiloinnin suorittamisen aikana voidaan dokumentoida esimerkiksi sekoitinkärjen pyörimisnopeutta, tankojen nostonopeutta, sideaineen syöttöpainetta ja sideainemäärää (Liikennevirasto 2010). Sideainemäärä pilarimetriä kohden voidaan punnita tietyssä ajassa käytetyn sideaineen massan perusteella. Syvästabilointityö kestää usein viikkoja tai jopa kuukausia, joten työnaikaisella valvonnalla voidaan havaita mahdolliset suoritusvirheet. Työn pitkän

keston vuoksi myös valmiiden pilareiden toteutuneen laadun perusteella voidaan tehdä korjauksia jäljellä olevien pilareiden suoritustapaan tai seosaineen reseptiin.

#### **4.4 Lopputuloksen laadunvalvonta**

Valmiit pilarit koestetaan sovitun lujittumisajan jälkeen, jotta nähdään täyttävätkö pilarit ennen työn suorittamista annetut tavoitteet. Valmiilta pilareilta vaaditaan sovittu lujuus, tasalaatuisuus ja oikea sijainti. Puutteita lujuudessa ja tasalaatuisuudessa voi esiintyä, vaikka urakoitsija on suorittanut stabilointityön sovitulla tavalla. Yleensä laboratoriossa sekoitetut koekappaleet onnistuvat paljon paremmin kuin maastossa in-situ sekoitetut pilarit. Työnaikaisella lopputuloksen laadunvalvonnalla voidaan usein havaita puutteita ja korjata menetelmää siten että loput pilareista vastaavat paremmin asetettuja laatuvaatimuksia. Valmiiden pilareiden koestuksella varmistetaan, että halutut rakenteet tai rakennekerrokset voidaan sijoittaa syvästabiloinnilla vahvistetun maan varaan siten että alueen painumat pysyvät halutulla tasolla ja stabiliteetti säilyy.

#### **4.5 Yleistä laadunvalvontamenetelmistä**

Tässä työssä tarkastellaan toteutuneen syvästabiloinnin ja yksittäisten pilarien tutkimiseen käytettäviä maastossa suoritettavia geofysikaalisia koestus- ja havainnointimenetelmiä sekä yleisimpiä kairausmenetelmiä. Nykyisin laadunvalvontaan käytetään yleisimmin erilaisia kairausmenetelmiä, joissa vaihtelevat käytettävä puristus- tai lyöntilaitteisto sekä tankojen päässä olevan karkikappaleen muoto ja läpimitta. Mittaustulosten epätarkkuus, suorittamisen tekninen vaativuus ja tarkempien menetelmien korkea hinta ovat olleet yleisiä rajoitteita uusien kairausmenetelmien ja geofysikaalisten menetelmien käytölle.

Koestusta voidaan suorittaa myös laboratoriossa valmiista kovettuneesta pilarista otetuille näytekappaleille, mikä vaatii huolellista näytteenottoa maastossa, kuljettamista, varastoimista ja standardien mukaisia puristuskokeita. Näytteenotto on yleensä työlästä, kallista, aikaa vievää ja virheherkkää. Lisäksi näytteenotto voi epäonnistua jos pilarin lujuus on liian suuri ja näytepalaa ei saada (Liikennevirasto 2010). Laboratorioolosuhteissa häirityille näytteille suoritettavat kokeet eivät anna riittävän luotettavaa kuvaa pilarin laadusta vaikka lujuudenmäärittyskoe sinällään olisi luotettava. Myös pilarinäytteiden hauraus rajoittaa näytteenoton hyödyllisyyttä. Pilarinäytteen puristuslaboratoriossa antaa usein ehjän kohdan lujuudesta liian hyvän kuvan ja hauraan kohdan lujuudesta liian huonon kuvan.

#### **4.6 Laadunvalvontamenetelmien kehitys**

Vaikka nykyisin käytetään enimmäkseen kairausmenetelmiä, myös muut menetelmät voivat soveltua laadunvalvontaan, jos niillä saadaan selville tarvittavat valmiin pilarin ominaisuudet. Laadunvalvontamenetelmillä pitäisi pystyä varmistamaan että pilarit ovat tarpeeksi lujia ja ehjiä sekä sijaitsevat oikeissa paikoissa. Sopivia menetelmiä voivat olla esimerkiksi aaltoliikkeeseen, sähköjohtavuuteen, radioaktiivisuuteen, lämpötilaan, pH:n kehittymiseen ja magneettisuuteen perustuvat geofysikaaliset menetelmät.

Nykyisin käytävissä olevilla menetelmillä saadaan usein keskenään ristiriitaisia tuloksia pilareiden lujuudesta ja tasalaatuisuudesta. Yleensä on mahdotonta päätellä minä menetelmän antamiin tuloksiin kannattaa luottaa eniten. Valmiiden pilareiden laadunvalvontaan tarvitaan uusia, nopeampia ja luotettavampia menetelmiä. Lisäksi uusia menetelmiä tarvitaan ainakin vanhojen menetelmien kalibroimiseksi ja tulosten oikeellisuuden varmistamiseksi.

## 5 Kairausmenetelmät ja pilarinäytteenotto syvästabiloinnin laadunvalvonnassa

### 5.1 Valmiin pilarin kairaaminen

Kairausmenetelmien käyttö verrattuna muihin mahdollisiin menetelmiin on suhteellisen edullista, nopeaa ja luotettavaa. Kairausmenetelmillä saadaan määritettyä pilarin lujuus välillisesti muiden helpommin havaittavien suureiden avulla. Normaleille pilareille käytettyjä kairausmenetelmiä ovat pilari- ja pilarisiipikairaus, puristinheijari- ja CPTU-kairaus ja pilarinäytteen puristuskoe laboratorioissa (Liikennevirasto 2010). Kairausmenetelmillä saadaan usein määritettyä pilarin lujuusominaisuudet ja tasalaatuisuus jatkuvana. Vaikka kairaaminen on ainetta rikkova menetelmä, pilari rikkoutuu yleensä vain paikallisesti, eikä rikkoutuminen vaikuta merkittävästi sen kuormankestävyyteen.

Jotta kairaaminen voidaan suorittaa, pilarien yläpäästä pitää kaivaa esiin. Kairaaminen aloitetaan pilarin yläpäästä. Kun pilarit ovat pitkiä ja lujia, pilarin keskelle voidaan porata esireikä laadunvalvontakairauksen helpottamiseksi (Liikennevirasto 2010). Lujilla ja pitkillä pilareilla ongelmaksi muodostuu usein kairatangon taipuminen ja kairan kärjen karkaaminen pois pilarin sisältä.

Laadunvalvontakairauksia pitää tehdä kattavasti koko syvästabiloidulta alueelta (Liikennevirasto 2010). Vierekkäisten pilareiden kairaamista vältetään, koska kairausmenetelmän suorittaminen heikentää pilarin lujuutta ja samalla pilarikentän toimintaa. Kairauksissa suositellaan käyttämään menetelmää, jolla saadaan edustava kuva yksittäisen pilarin koostumuksesta. Parhaiten sopiva kairausmenetelmä valitaan pilarien oletetun lujuuden, läpimitan, pituuden ja tarvittavien tietojen perusteella.

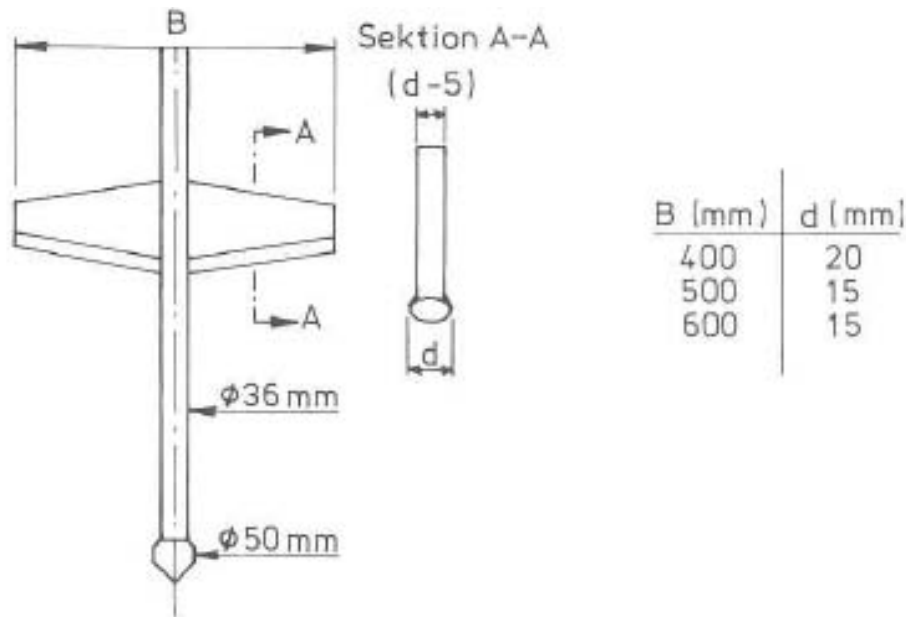
Laadunvalvontaan käytettäviin kairauksiin ei voi luottaa täydellisesti. Pilariin tunkeutumiseksi tarvitaan suhteellisen järeitä laitteita, jotka eivät ole riittävän herkkiä havaitsemaan tarkasti lujuuden ja homogeenisuuden vaihteluita. Herkät laitteet eivät puolestaan kestä pilariin tunkeutumisen aiheuttamia rasituksia. Vaikka kairaaminen on kallista, se on kuitenkin tällä hetkellä järkevin ja edullisin tapa syvästabiloinnin työnjälkeeseen laadunvalvontaan.

### 5.2 Pilarikairaus

Pilarikairaus on yleinen syvästabiloitujen pilarien laadunvalvontaan käytettävä menetelmä (Liikennevirasto 2010). Kuvassa 4 on esitetty kairaustangon alapäähän asennettavan 2-siipisen kärkiosan muodot ja mitat. Helsingin kaupungin alueella yleisesti syvästabiloinnin laadunvalvontakairauksia suorittava STARA käyttää yleensä vastaavaa mutta 3-siipistä kärkiosaa (Keränen 2011). Ramboll käyttää laadunvalvontakairauksissa yleensä 2-siipistä kärkiosaa (Winqvist 2011). Siipien käyttö antaa paremman kuvan koko pilarin poikkileikkauksesta. Aikaisemmin syvästabiloinnin suorittamisessa olleiden puutteiden vuoksi pilarin keskiosaan muodostui heikompi vyöhyke, jota pitkin pilarikairan kärki seurasi helpommin. Nykyisin pilarin sekoitustekniikka on kuitenkin parantunut ja keskiosa on yleensä yhtä lujaa kuin pilarin muutkin osat.

Pitkiä pilareita koestettaessa kairan kärki ohjautuu usein ulos pilarista. Lisäksi menetelmän rajoitteena on pilarikairan kärjen huono tunkeutuvuus, kun pilarin leikkauslujuus on yli 200 kPa (Liikennevirasto 2010). Pilarikairan tunkeutumisen ja pilarissa pysymisen helpottamiseksi pilarin keskelle voidaan porata esireikä. Löyhille leikkauslujuudeltaan alle 200 kPa:n pilareille pilarikairaus puristamalla on luotettava ja suhteellisen edullinen laadunvalvontamenetelmä.





Kuva 4. Pilarikairan kärkiosa (SGF 2000).

Kun monitoimikairauskoneen puristinkapasiteetti ylittyy, kairausvaunu voi nousta ylös maasta tai kairan kärki ei enää tunkeudu pilariin puristamalla. Tällöin pilarikairan kärki saadaan tunkeutumaan pilariin heijaroimalla. Puristin-heijarikairausmenetelmässä yhdistetään samaan kairausuoritukseen kaksi eri kairausmenetelmää. Pilarin pehmeät osat kairataan puristamalla ja lujuus osat heijaroimalla. Myös heijaroiminnan aikana voidaan käyttää kuvassa 4 esitetyn tyyppistä 2-tai 3- siipistä kärkiosaa (Keränen 2011).

Pilarikairalla saadaan kohtuullisen hyvin todennettua syvästabiloidun pilarin suhteelliset lujuudenvaihtelut. Lujuuden suuruusluokan arvioimiseksi pitää kuitenkin määrittää kokeellinen kantavuuskerroin  $N_c$  muilla menetelmillä kuten siipikairauksella. Kantavuuskertoimen suuruus vaihtelee yleensä välillä 10–35 (Melander 1989). Yleinen kantavuuskertoimen arvo pilarikairauksissa on 10 - 14. Kantavuuskertoimen suuruuteen vaikuttavat yleensä kairattavan kohteen tiiviys, muodonmuutosmoduuli, leikkauslujuus, kärjen muoto ja koko sekä kärjen tunkeutumisnopeus. Koska edellä mainitut ominaisuudet vaihtelevat eri kohteissa, kantavuuskerroin pitäisi määrittää jokaisessa kohteessa erikseen.

Pilarista halutaan yleensä tietää leikkauslujuus, joka saadaan laskettua likimääräisesti pilarikairaustuloksista kantavuuskertoimen ja kairausvastuksen avulla yhtälöllä 10 (Lah-  
tinen & Parkkinen 1992).

$$\tau_p = \frac{P - \sigma_0}{N_c} \quad (10)$$

missä

$P$  on kairausvastus [N]

$\sigma_0$  on maan tehokas pystysuora jännitys [Pa]

$N_c$  on kokeellinen kantavuuskerroin [-], joka saadaan vertaamalla pilari-  
kairaustulosten kairausvastusta siipikairaustuloksiin, jotka antavat ns. to-  
dellisen leikkauslujuuden

Vallitseva jännitys eli maan tehokas pystysuora jännitys  $\sigma_0'$  on huomattavasti pienempi kuin kärkevastus. Virhe on yleensä hyvin pieni, vaikka  $\sigma_0'$  jätetään pois yhtälöstä 10. Tällöin leikkauslujuuden määrittämiseksi voidaan käyttää yhtälöä 11. (Melander 1989.)

$$\tau_P = \frac{P}{N_c} \quad (11)$$

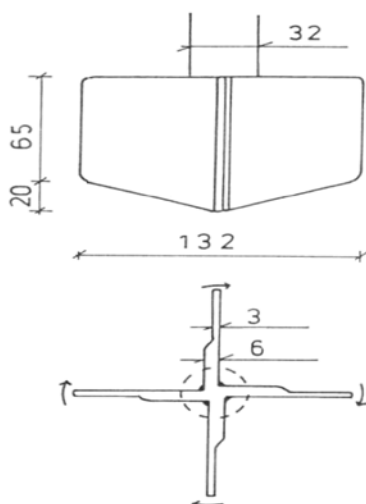
Pilarikairauksen edut ovat suorittamisen nopeus, tulosten jatkuvuus ja suhteellisen alhainen hinta muihin menetelmiin verrattuna. Pilarikairan käytön suurin ongelma on kärjen ohjautuminen ulos pilarista. Pilarikairaustuloksissa on mukana myös vaippavastus, joka vääristää tuloksia erityisesti heijarointivaiheessa. Heijaroimalla saaduissa tuloksissa voi esiintyä valheellista lisälujuutta vaihtelevan vaippavastuksen vuoksi.

### 5.3 CPTU- kairaus

Puristinkairalla (CPTU) saadaan suoraan pilarin puristuslujuus kairan kärjestä sähköisesti (Lahtinen & Parkkinen 1992). Tällä menetelmällä voidaan lisäksi mitata huokosvedenpainetta ja vaippahankausta. CPTU- kairaus soveltuu erityisesti lujien pilareiden koestamiseen. Pilarin poikkileikkauksen ominaisuuksista ei tällä menetelmällä saada pilarikairaukseen verrattuna yhtä kattavaa tietoa, koska käytettävä kairakärki on poikkileikkaukseltaan vain 10 cm<sup>2</sup>. Myös CPTU- kairauksen yleinen ongelma on, että kärki karkaa ulos pitkistä pilareista.

### 5.4 Pilarisiipikairaus

Pilarisiipikairauksella saadaan mitattua suoraan pilarin leikkauslujuus. Mittaustulokset saadaan tietyiltä syvyysväleiltä, joten kairaustulos ei ole jatkuva. Pilarisiipikairauksessa käytetty kärkikappale on esitetty kuvassa 5. Ohjaavaa kärkiosaa käytetään kuten pilarikairassa, jos halutaan että kairaus pysyy paremmin pilarissa. Kärkikappaleen koko määräytyy pilarin lujuuden mukaan. Pehmeille pilareille voidaan käyttää suurempaa siipeä. (Lahtinen & Parkkinen 1992).



Kuva 5. Pilarisiipikairan kärkiosa (Syvästabilointiohje STO-91 1992).

Siipikairauksen etu on suoraan saatava leikkauslujuus. Huonoja puolia ovat tuloksen epäjatkuvuus, suorittamisen hitaus ja kärjen ohjautuminen ulos pilarista. Siipikairaus on hitaampi, hankalampi ja kalliimpi suorittaa kuin pilarikairaus. Siipikairauksella saatuja tuloksia kuitenkin käytetään pilarikairaustulosten kalibroimiseen, koska yksittäisen kai-

rausmenetelmän käyttö ei ole suositeltavaa ja siipikairausta pidetään luotettavana menetelmänä pilarin in-situ leikkauslujuuden määrittämiseen. Pilarisiipikairaustuloksien avulla määritetään syvästabilointikentän alueella käytettävä kokeellinen kantavuuskerroin  $N_c$ , yhtälöt 10 ja 11. Pilarikairaukset kalibroidaan säätämällä kantavuuskertoimen arvo sellaiseksi että yhtälöä 11 käyttämällä saadaan sama leikkauslujuus kuin siipikairauksella. Luotettavien tulosten saamiseksi pilarikairauksien yhteydessä pitäisi tehdä myös pilarisiipikairauksia. Yleisimpien Suomessa käytettävien kairausmenetelmien hyvät ja huonot puolet on koottu taulukkoon 5.

*Taulukko 5. Kairausmenetelmien edut ja vahvuudet (Lahtinen & Parkkinen 1992).*

<b>MENETELMÄ</b>	<b>MITATTAVA OMINAISUUS</b>	<b>MENETELMÄN EDUT</b>	<b>MENETELMÄN HAITAT</b>
Pilarikaira	- puristuslujuus - leikkauslujuus (välillisesti siipikairausten perusteella)	- nopeus - jatkuva	- ohjautuu ulos pilarista - vaippavastus mukana lukemissa
Puristinkaira CPT-U – kaira	- puristuslujuus - vaippakitka - huokosvedenpaine - leikkauslujuus	- mitataan kärkivastus - nopea, jatkuva - sopii lujittuneille sementti- ja kalkkisementtipilareille	- ohjautuu ulos pilarista - mittaa puristuslujuuden pieneltä pilarialalta - ei voida lyödä alas
Pilarisiipikaira	- leikkauslujuus	- leikkauslujuus saadaan suoraan mitattua	- epäjatkuva tulos - hidas - kaira ohjautuu ulos

## 5.5 Näytteenotto ja koestaminen

Valmiista pilareista voidaan ottaa näytteitä. Näytteenottimella poraamalla saaduista näytteistä voidaan tehdä halutun muotoisia koekappaleita, jotka voidaan koestaa laboratoriossa erilaisin menetelmin. Näytteenottoa suositellaan käytettäväksi vain muita menetelmiä täydentävänä tietona (Liikennevirasto 2010). Näytteenotto voidaan suorittaa joko poraamalla näytteenottimella tai nostamalla maasta ylös kokonaisia pilareita. Pilarin pintaosien nostaminen onnistuu esimerkiksi kaivinkoneella noin 2-3 metrin syvyyteen saakka. Kokonaisen pilarin nostaminen on huomattavasti suurempi operaatio, joka vaatii erikoiskalustoa kuten suuriläpimittaista putkea, kaivinkoneen ja nosturin.

Näytteenottimen käytössä suurin ongelma on pilarin hauraus. Pilarinäyte yleensä häiriintyy näytteenoton yhteydessä. Tällöin riskinä on, että pilarista saadaan koestettua vain hyvin lujittuneet kohdat. Murentuneiden kohtien lujuutta ei voida mitata, joten niiden lujuus jää todellista lujuutta huonommaksi (Liikennevirasto 2010). Toisaalta koestettaviksi sopivat, ehjinä säilyneet ja hyvin lujittuneet kohdat antavat pilarin lujuudesta liian hyvän kuvan.

Koko pilarin ylösnostossa on samoja ongelmia kuin pienemmänkin näytteen ottamisessa. Pilari häiriintyy kun se nostetaan ylös maasta, eikä siitä enää pysty suurelta osin määrittämään todellista lujuutta. Kokonaisen pilarin nostaminen on hankalaa ja kallista,

minkä vuoksi sitä tehdään suhteellisen harvoin. Se on kuitenkin suhteellisen varma ja havainnollinen menetelmä, kun muilla menetelmillä ei saada selville pilaroinnissa esiintyneitä ongelmia tai halutaan selvittää pilarien homogeenisuutta. Pilarin ylösnostoa on nyt lähiaikoina suoritettu mm. Espoon Hansavalkamassa, kun etsittiin syitä putkijohdon alla olleen syvästabiloinnin epäonnistumiseen.

## 5.6 Syvästabiloinnin laadunvalvonnan kustannukset

Yleensä projektin suunnitteluvaiheessa kohteen pohjarakennussuunnittelija määrää tietyn määrän valmiista pilareista koestettavaksi. Pienissä kohteissa voidaan koestaa esimerkiksi 10–20 pilaria. Suuremmissa kohteissa voidaan koestaa useita kymmeniä pilareita. Koestettavat pilarit pyritään valitsemaan sillä tavoin että saadaan kokonaiskuva pilarikentän onnistumisesta. Kairaustulosten perusteella arvioidaan pilarikentän onnistuminen, jota voidaan arvioida esimerkiksi pilarin leikkauslujuuden, muodonmuutosmoduulin ja homogeenisuuden perusteella. Jos pilarit ovat onnistuneet edellä mainituille parametreille asetetuissa sallituissa rajoissa, syvästabilointityö voidaan hyväksyä ja työ otetaan vastaan. Pohjasuhteiltaan ja maaperäominaisuuksiltaan vaihtelevilla alueilla koestetaan suhteellisesti enemmän pilareita kuin alueilla, joiden maaperäolosuhteet tunnetusti vaihtelevat vain vähän. Kairauksen kustannukset määräytyvät koestettavan pilarimetrimäärän ja koestamiseen kuluvan ajan mukaan. Nopeasti suoritettava menetelmä tulee yleensä aikaa vievää edullisemmaksi. (Rantala 2011).

Taulukossa 6 on esitetty tavallisimpien pilarinkoestusmenetelmien kustannuksia Tiehallinnon kohteissa (Tiehallinto 2002). Taulukon tietoja käytettäessä pitää huomioida että rakennuskustannukset ovat kohonneet vuodesta 2002 vuoteen 2011 noin 35 %. Pilarikairaus on tämänhetkistä menetelmistä edullisin ja yleensä myös käyttökelpoisin. 10 m pitkän pilarin koestaminen maksaisi nykyhinnoilla noin 250 €. Jos pilarikentästä koestetaan 20 pilaria, kustannukset olisivat noin 5000 €. Pilaripituuden kasvaessa myös kairauskustannukset kasvavat, koska pitkän pilarin kairaamiseen kuluu enemmän aikaa.

Siipikairauksen kustannukset ovat huomattavasti suuremmat, koska näytteitä pitää ottaa samasta pilarista useita eri syvyyksiltä ja hinta määräytyy havaintojen lukumäärän perusteella. Kun 10 m:n pilarista havainnoidaan leikkauslujuus metrin välein, yhden pilarin koestaminen maksaisi noin 600 €. Käytännössä pilarikentillä tehdään siipikairaus vain 1-3 pilarille, todellisen leikkauslujuuden ja kantavuuskertoimen määrittämiseksi. Loput pilarikentän pilarit koestetaan pilarikairalla, jonka tulosten tulkintaan käytetään siipikairaustulosten perusteella määritettyä kantavuuskerrointa. Kantavuuskerroin määritetään siten että pilarikairaustulosten avulla laskettu leikkauslujuus saadaan vastaamaan siipikairauksilla saatua leikkauslujuutta.

*Taulukko 6. Pilarin koestusmenetelmien hintoja (Tiehallinto 2002).*

Koestus- telmä	mene- Alin hint	Ylin hint	yksikkö
Pilarikairaus	13,5	24	€/m
Pilarisiipikairaus	32	54	€/havainto
CPT- kairaus	15	30	€/m
Näytteenotto	50	88	€/näyte
Ruuvilevykoe	168	336	€/kpl
Pilarin nosto(3-4)	--	5100	€/tv

## 6 Geofysikaalisten menetelmien soveltuvuus syvästabiloinnin laadunvalvontaan

### 6.1 Geofysikaaliset mittausmenetelmät

Geofysikaalisia mittausmenetelmiä on aiemmin käytetty mm. malmin- ja öljynetsintään. Nykyään niitä käytetään apuna myös ympäristötutkimuksessa ja geoteknisessä suunnittelussa (Aalto 1998). Geofysikaalisten menetelmien suurimpia vahvuuksia ovat ainetta rikkomattomuus ja alueellinen kattavuus (Peltoniemi 1988). Lisäksi geofysikaaliset mittaukset ovat usein nopeita ja hinnaltaan edullisia suorittaa. Hyvän alueellisen kattavuuden haittapuolena on usein tulosten yleisluontoisuus, tutkittavien materiaalien yksityiskohtaisia ominaisuuksia ei havaita riittävällä tarkkuudella. Tulkinta voi olla myös monikäsitteistä. Toisinaan saadaan liian paljon liian tarkkaa tietoa, jolloin tulosavaruudesta on vaikea erottaa haluttuja asioita. Geofysikaalinen mittaustapa valitaan mittaushaasteen olosuhteiden ja tulosten halutun tarkkuuden perusteella. Yleispiirteisellä mittauksella ei saada tarkkaa tietoa, eikä pienipiirteisellä mittauksella saada yleispiirteistä tietoa. Usein on hyödyllistä suorittaa ensin yleispiirteinen mittaus, jonka jälkeen voidaan saatua yleiskuvaa tarkentaa pienipiirteisemmällä mittauksella. Hyvän kokonaiskuvan ja yksityiskohtaisten tietojen saamiseksi olisi hyödyllistä tehdä mittauksia useilla eri tarkkuus-tasoilla.

Tavanomaiseen malminetsintään verrattuna maarakentamiseen liittyvissä geofysikaalisissa mittauksissa tarkkuus, yksityiskohtaisuus ja luotettavuus ovat olleet korostetun tärkeitä (Peltoniemi 1988). Syvyysulottuvuus sen sijaan ei ole ollut niin tärkeää. Maarakentamisessa tärkeitä ovat myös taloudelliset tekijät, sillä tehtyjen tutkimusten hinta vaikuttaa suoraan lopputuotteen hintaan. Maarakentamishankkeissa kustannukset pyritään sekä optimoimaan että minimoimaan, jolloin valitaan yleensä edullisin tutkimusmenetelmä, jolla saadaan kohtuullisen hyviä tuloksia. Todella hyvää, mutta kallista menetelmää tarvitaan harvoin. Vastaavasti edullista menetelmää, jolla saa huonoja tuloksia, käytetään harvoin. Taloudellisuuteen vaikuttavat erityisesti mittausten nopeus, suorituksen helppous ja suorituskustannusten edullisuus.

Geofysikaalisia menetelmiä luokitellaan monin eri tavoin. Yleisin luokittelutapa perustuu menetelmällä havaittavaan ominaisuuteen. Havaittavia ominaisuuksia ovat esimerkiksi magnetoituma, tiheys, sähkönjohtavuus ja kimmoaaltojen nopeus. Toinen usein käytetty luokittelutapa perustuu mittaustapaan ja havaintopaikkaan. Mittaustavan perusteella menetelmät voidaan jakaa luokkiin, joita ovat kaukokartoitus, lentomittaukset, maastomittaukset, reikämittaukset ja laboratoriomittaukset. (Peltoniemi 1988.)

### 6.2 Pilarin ominaisuuksien tutkiminen geofysikaalisilla menetelmillä

Stabiloitua rakennetta voidaan tutkia erilaisilla geofysikaalisilla menetelmillä, jotka hyödyntävät mm. seismiikkaa, vastusluotausta ja erilaisia tutkausmenetelmiä (Arkima et al. 1994). Geofysikaalisten menetelmien käyttö edellyttää yleensä runsaasti vertailututkimuksia laboratoriossa ja kentällä. Menetelmillä ei saada lujuutta ja homogeenisuutta suoraan mitattuna vaan se pitää päätellä epäsuorasti muiden suureiden avulla. Lisäksi yksittäisillä menetelmillä saadut lujuus- ja homogeenisuusarvot ovat yleensä vain viitteellisiä. Tarkempia tietoja kohteesta voidaan mahdollisesti saada käyttämällä useita rinnakkaisia menetelmiä.

Taulukossa 7 on esitetty kallion ominaisuuksia, jotka voidaan arvioida geofysikaalisilla menetelmillä. Taulukossa on esitetty myös karkea arvio menetelmien soveltuvuudesta

eri materiaaliominaisuuksien mittaamiseen. Suurin osa taulukon 7 geofysikaalisista menetelmistä ei sovellu syvästabiloinnin laadunvalvontaan. Lisäksi kallion ja stabiloidun saven geofysikaalisilla menetelmillä mitattavat ominaisuudet ovat yleensä eri suuruusluokkaa, joten sama laite samoilla säädöillä ei välttämättä toimi molempien materiaalien saman ominaisuuden määrittämiseen. Taulukossa 7 esiintyvistä kallion ominaisuuksista tiheys ja kimmo-ominaisuudet voisivat antaa viitteitä myös pilarin homogeenisuudesta ja lujuudesta, vaikka kallio ja pilari ovatkin ominaisuuksiltaan ja rakenteeltaan erilaisia materiaaleja.

*Taulukko 7. Geofysikaalisten mittausten arvioitu soveltuminen kallion ominaisuuksien mittaamiseen. Merkintä · tarkoittaa soveltuvaa, (·)varauksin soveltuvaa. (Dammert ja Väättäinen 1986).*

MENETELMÄT	MITATTAVA OMINAISUUS										
	Kivilajivaihtelu	Mineralogia	Rakotiheys	Rakojen sijainti	Rakojen suunta	Rakojen avauma	Huokoisuus	Kallion tiheys	Kimmo-ominaisuudet	Lämpötilagradientti	Veden laatu
<b>SÄHKÖISET</b>											
Pistevastus	·		·	·			(·)				
Ominaisvastus, normaali	·		·	·		(·)	·			(·)	
Ominaisvastus, fokusoitu	·			·		(·)				(·)	
Pohjaveden ominaisvastus										·	
Dipmeter			·	·	·						·
Latauspotentiaali			·	·	·						·
<b>MAGNEETTISET</b>											
Suskeptibiliteetti	·										·
<b>RADIOMETRISET</b>											
Luonnon gamma	·	·		·							·
Gamma-gamma	·	·		·			·	·			·
Neutron-neutron	·	·		·			·			·	·
<b>SEISMISET</b>											
Akustinen	·		·	·		(·)	·		·		·
Putkiaalto				·		(·)				·	·
Pystyluotaus	·			·	·						·
Monireikämittaus									·		·
<b>SÄHKÖMAGNEETTISET</b>											
Tutka	·		·	·	·						·
Transientti	(·)			(·)							·
<b>LÄMPÖTILA</b>											

### 6.3 Mittaustapojen soveltuvuus syvästabiloidun pilarin havainnointiin

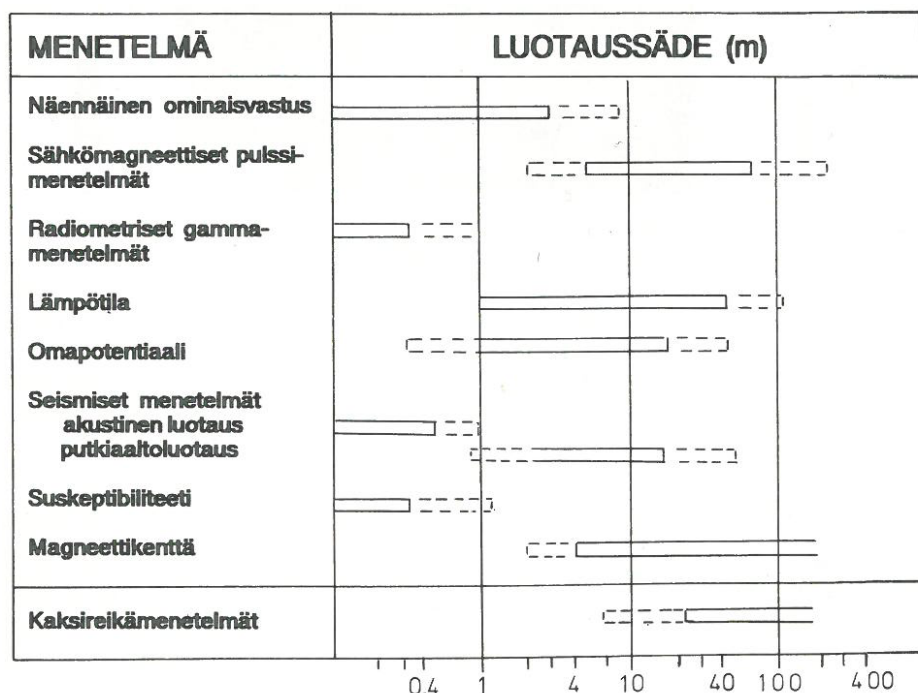
Syvästabiloituja pilareita voidaan geofysikaalisesti tarkastella maanpinnalta tai tehdä reikämittauksia pilarin keskelle tehdystä reiästä (Aalto 1998). Reiästä tehtävillä mittauksilla saadaan tarkempaa tietoa syvemältä, joten niillä voidaan mahdollisesti tarkentaa maanpintamittauksilla saatuja tuloksia (Peltoniemi 1988). Reikämittauksilla päästään tekemään mittaukset lähellä tutkittavaa kohdetta, jolloin maaperästä aiheutuvia virhelähteitä on vähemmän. Laadunvalvonnan kannalta reikämittauksilla on mahdollista saada huomattavasti tarkempia tietoja pilareista kuin maanpinnalta tehtävillä mittauksilla. Tarkemmalla tiedolla tässä yhteydessä tarkoitetaan pilarin lujuusominaisuuksia ja rakenteellisia ominaisuuksia. Maanpinnalta tehtävien mittausten käyttökelpoisuus rajoittuu tällä hetkellä lähinnä pilareiden pintaosan olemassaolon toteamiseen ja viitteellisen maaperämallin laatimiseen syvästabiloitavasta alueesta. Tässä työssä tarkastellaan eri-

tyisesti geofysikaalisia reikämittaussuunnitelmia, koska niillä tehtävät mittaukset ovat riittävän tarkkoja syvästabiloidun pilarin kaltaisen rakenteen tutkimiseen.

Lentomittaukset ja kaukokartoitus tarjoavat hyvin yleispiirteistä tietoa tutkittavasta alueesta. Niiden tyyppiset menetelmät soveltuvat huonosti pienten kohteiden tarkasteluun, joten ne eivät sovellu pilarin ominaisuuksien yksityiskohtaiseen havainnointiin. Myös laboratoriossa on mahdollista tehdä tarkkoja geofysikaalisia mittauksia. Laadunvalvonnan kannalta tärkeimmät selvittävät asiat ovat kuitenkin maastossa oikeassa kohteessa in situ saavutetut lujuuteen ja homogeenisuuteen verrannolliset suureet. Maastossa sekoitettu pilari eroaa huomattavasti laboratoriossa sekoitetusta pilarista sekä lujuudeltaan että homogeenisuudeltaan. Lisäksi pilarin ja pilarikentän todellisten olosuhteiden mallintaminen laboratoriossa koestamistilanteen aikana on vaikeaa, vaikka pilarista saataisiinkin häiriintymätön näyte. Laboratoriossa suoritettavat mittaukset eivät ole riittävän käyttökelpoisia ja luotettavia syvästabiloinnin lopputuloksen laadunvalvontaan.

## 6.4 Geofysikaaliset reikämittaukset

Merkittävimpiä käyttökohteita reikämittauksille ovat olleet öljynetsintä ja ydinjätteiden sijoituspaikatutkimukset. Taloudellisen merkittävyyden ja turvallisuuden vuoksi näihin tarkoituksiin on käytetty lähes kaikkia mahdollisia olemassa olevia reikämittaussuunnitelmia. Kuva 6 havainnollistaa eräiden geofysikaalisten reikämittaussuunnitelmien sivusuuntaista ulottuvuutta. Kuvan perusteella voidaan tehdä alustavia päätelmiä, mitkä menetelmistä sopivat syvästabiloidun pilarin kokoisen rakenteen tarkasteluun. Pilarin laadunvalvonnan kannalta on oleellista, että mittausreiän läheltä saadaan mahdollisimman tarkkaa tietoa. Kuvan 6 menetelmistä 4/9 sopisi luotaussäteen perusteella pilarin ominaisuuksien mittaamiseen, kun pilarin säde on 0,25 m – 0,4 m. Vaikka joidenkin menetelmien luotaussäde on liian suuri pilarin tutkimiseen, niiden lähitarkkuutta voidaan mahdollisesti parantaa mittalaitteiston muutoksilla ja myöhemmän tutkimuksen sekä mittalaitteistojen kehityksen tuloksena.



Kuva 6. Reikämittaussuunnitelmillä mahdollisia luotaussäteitä (Saksa 1985).

Reikämittausten suorittamiseksi pilariin pitää tehdä reikä. Tämä on menetelmän perusedellytys, mutta samalla myös heikkous. Reiän vuoksi menetelmä ei ole täysin ainetta rikkomaton. Pilariin reikämittausta varten tehtävä reikä on läpimitaltaan pieni eikä aiheuta kokonaiseen pilariin merkittävää puristuslujuuden alenemista. Esimerkiksi 76 mm:n reikä on vain noin 2,3 % 500 mm pilarin poikkileikkauksen alasta. Puristuslujuus on suoraan verrannollinen pilarin poikkileikkauksen alaan, joten pilarin puristuslujuus alenisi reiän vaikutuksesta noin 2,3 %. Lisäksi pitää huomioida, että porattavan reiän ulkopuolinen osa pilarista voi vaurioitua. Vaurioiden syntymisen ehkäisemiseksi reiän poraaminen pitäisi tehdä mahdollisimman vähän pilaria vaurioittavalla menetelmällä. Jos reiän ulkopuolinen pilari kuitenkin vaurioituu, pitää arvioida syntyvien vaurioiden vaikutus lujuuden alenemaan.

Reikämittauksien sivusuuntainen ulottuvuus on pieni. Yhteen reikään tehtävillä mittauksilla saadaan tietoa yleensä suhteellisen pieneltä etäisyydeltä reiän seinämästä (SGY 1993). Useiden reikien avulla tehtävillä mittauksilla saadaan tietoa laajemmalla alueella reikää ympäröivien maakerrosten ominaisuuksista. Tässä työssä käytetään yhdestä reiästä tehtäviä mittauksia, koska tutkittava kohde, pilari on halkaisijaltaan riittävän pieni. Lisäksi työssä on tarkoitus tutkia erityisesti pilaria, ei ympäröivää maaperää.

Ennen reikämittauksen suorittamista pitää huomioida käytettävän laitteiston ja vallitsevien olosuhteiden asettamat rajoitteet, jotta menetelmän käyttö ja saatavat tulokset ovat järkeviä. Käytettävien mittausturien täytyy olla kohtuullisen pienikokoisia, jotta ne sopivat pora- tai kairausreikään (Peltoniemi 1988). Lisäksi käytettävien mittalaitteiden täytyy olla vettä ja painetta kestäviä. Reiän tukkeutumisen ja sortumisvaaran vuoksi mittalaitteistolta edellytetään myös suhteellisen hyvää kestävyyttä ja vetolujuutta. Yleensä mittalaitteet ovat kalliita, joten niiden toistuva reikään jääminen tulee ajan mittaan kalliiksi. Joidenkin mittalaitteiden lähettimet ja vastaanottimet ovat niin edullisia, että niiden jättämistä maaperään voi harkita.

Laadukkaan, riittävän suuriläpimittaisen ja avoimena pysyvän reiän poraaminen kovetuneeseen pilariin on kallista verrattuna geofysikaalisten menetelmien suorittamiseen. Reiän poraaminen pilariin nostaa huomattavasti geofysikaalisten mittausten hintaa. Vaihtoehtoinen menetelmä reiän poraamiselle on suojaputken työntäminen pilariin ennen sen lujittumista. Suojaputkena voidaan käyttää esimerkiksi PVC- tai HDPE- putkia, joita käytetään pohjavesimittauksiin. Toinen mahdollisuus on käyttää inklinometrimittauksissa käytettäviä putkia, joiden läpimitta on hiukan pohjavesiputkia suurempi. Muoviputken sijaan suojaputkena voidaan käyttää metalliputkea, jonka suurempi jäykkyys helpottaa asentamista. Metalleilla on kuitenkin muoviin verrattuna suurempi tiheys ja sähkönjohtavuus, joten metalliputken käyttö suojaputkena usein joko estää geofysikaalisten mittausten menetelmien käytön tai aiheuttaa paljon häiriöitä mittaustuloksiin. Sekä muovisten että metallisten suojaputkien käyttäminen häiritsee mittausta.

Suhteellisen edulliset esimerkiksi pohjavesinäytteenottoon tarkoitetut putket ovat läpimitaltaan hiukan liian pieniä reikämittauksiin. Suurempiläpimittaiset putket maksavat enemmän kuin ohuimmat putket, jolloin kustannukset nousevat huomattavasti. Lisäksi suuremmille putkille ei ole olemassa valmista asennuslaitetta. Suojaputken asentamiseen liittyy myös paljon työtekniisiä kysymyksiä, jotka pitää ratkaista ennen kuin suojaputken käyttö on järkevää ja kustannustehokasta. Putkien asentaminen pehmeään pilariin toisi yhden lisätyövaiheen nykyiseen syvästabilointityöhön, mikä osaltaan nostaisi kustannuksia. Lisäksi putken asentaminen voi olla hyvin vaikeaa, jos sekoitetussa pilariin on louhetta, kiviä tai kivistä täytettä. Joissain tapauksissa suojaputken käyttö voi



olla ainoa tapa saada mittaus suoritettua. Tällöin pitää tilanteen mukaan harkita, saadaanko suojaputken kautta tehdyillä mittauksilla riittävän hyviä tuloksia.

Suojaputkelta edellytetään riittävää jäykkyyttä ja koossapysyvyyttä, jotta se saadaan asennettua pilariin ja putki pysyy auki maaperän aiheuttamasta puristuksesta huolimatta. Toisaalta putken seinämä ei saa olla liian paksu eikä materiaalin tiheys saa olla liian suuri. Putki häiritsee aaltoliikkeiden, värähtelyiden ja säteilyn liikkumista lähettimestä pilariin ja vastaanottimeen, joten on edullista että putki on mittausten kannalta mahdollisimman huomaamaton. Putken ja reiän olemassaolo vaikeuttaa useimpien geofysikaalisten menetelmien käyttöä syvästabiloidun pilarin laadunvalvonnassa. Suojaputkea käytettäessä on vaarana, että geofysikaalisilla menetelmillä saadaan tietoa vain reiästä ja käytetystä putkesta, eikä mitään tietoja pilarista. Ilman suojaputkea tehtävillä mittauksilla saadaan huomattavasti tarkempia ja luotettavampia tuloksia kuin suojaputken kautta tehtävillä mittauksilla.

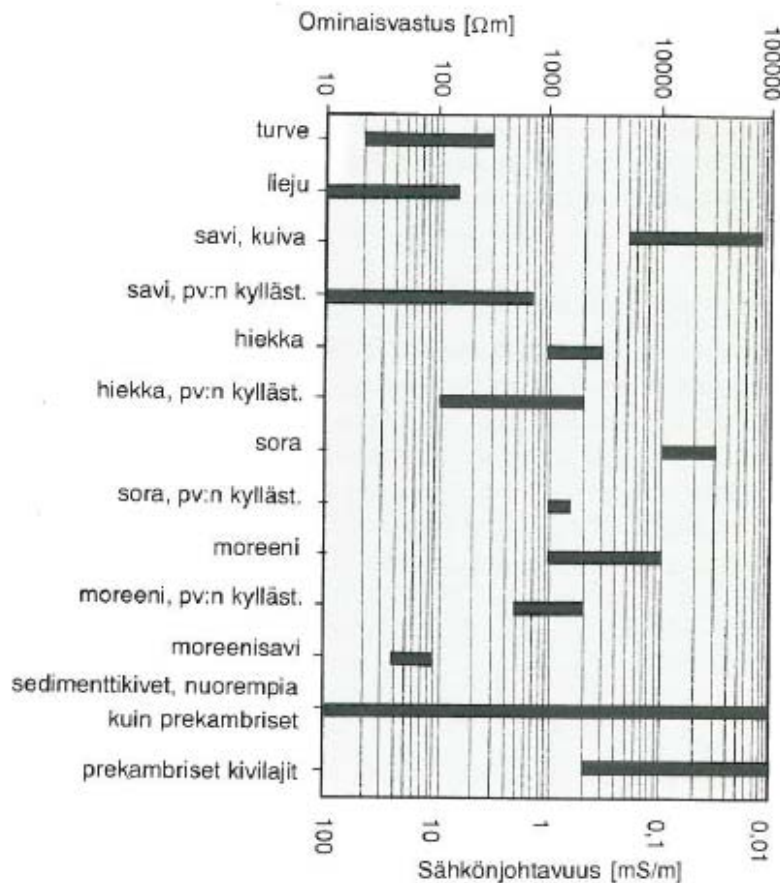
## **6.5 Magneettiset reikämittaukset**

Magneettisilla menetelmillä on hyvä syvyysulottuvuus sekä hyvä kivilajinerotus- ja luokittelukyky (Peltoniemi 1988). Lisäksi magneettisilla menetelmillä suoritettut mittaukset ovat usein suhteellisen helppokäyttöisiä, luotettavia ja hinnaltaan edullisia. Myös mittauksilla saadun aineiston tulkitseminen onnistuu yleensä kohtuullisella vaivalla, varsinkin jos kohteesta on käytössä hyvät taustatiedot. Magneettisilla reikämittauksilla mitataan yleensä joko kiven susceptibiliteettiä tai magneettikentän voimakkuutta kairatuissa rei'issä. Susceptibiliteetti kuvaa magneettisten mineraalien kuten magnetiitin pitoisuutta materiaalissa.

Materiaalin susceptibiliteetin ja induktiivisen johtokyvyn muutokset voidaan havaita siltakytkentään liitetyn vastaanotinkelan impedanssin muutoksen perusteella. Susceptibiliteetti vaikuttaa impedanssin reaktiiviseen ja johtokyky resistiiviseen komponenttiin. Susceptibiliteetin mittausta hyödynnetään louhinnan ohjauksessa ja kivilajirajojen määrittämisessä. Magneettikentän voimakkuuden mittauksia on hyödynnetty mm. rautamalmien inventointitutkimuksissa. (Peltoniemi 1988).

## **6.6 Sähköiset reikämittaukset**

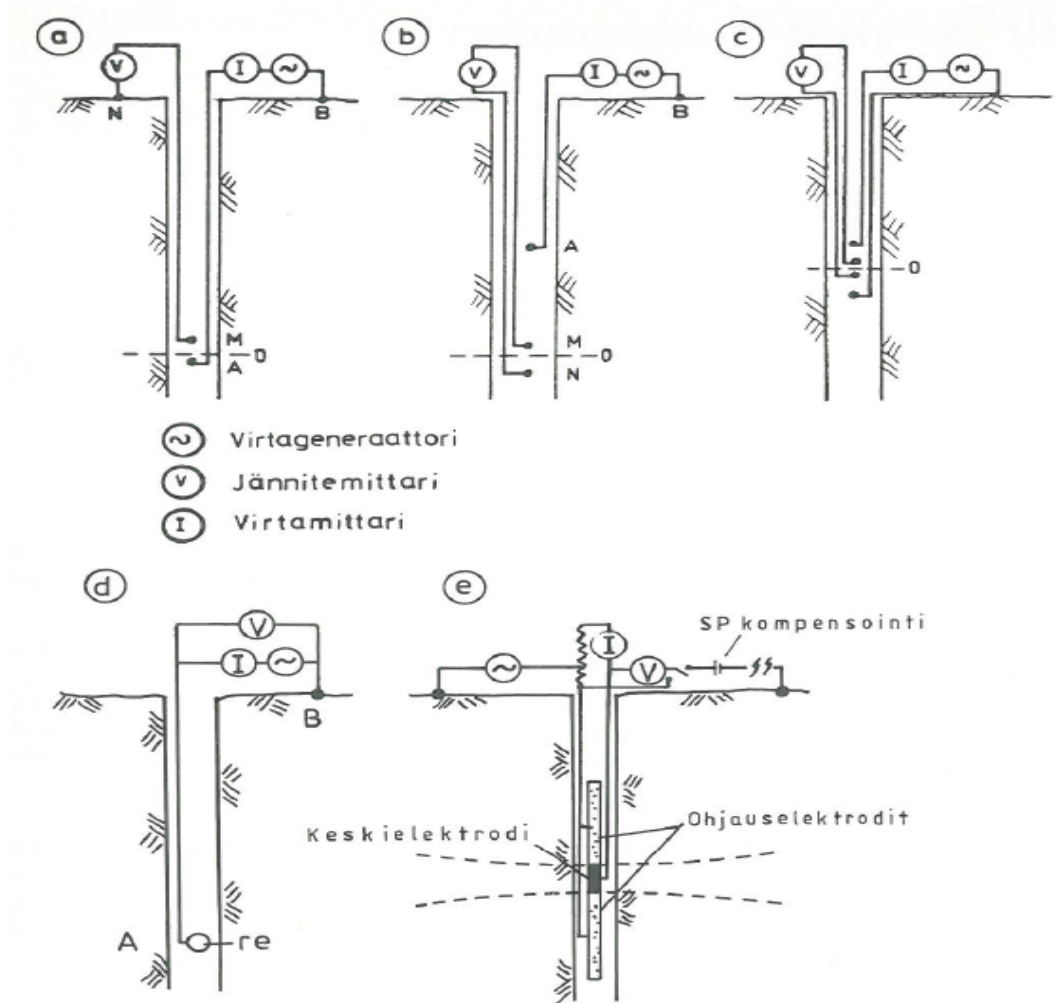
Sähköiset menetelmät perustuvat maaperän sähkönjohtavuuden ja sähköisen ominaisvastuksen vaihteluun. Kuvassa 7 on esitetty sähkönjohtavuuden ja ominaisvastuksen keskimääräisiä arvoja eri maalajeissa. Materiaaleja kutsutaan eristeiksi, jos niillä on hyvin pieni sähkönjohtavuus. Materiaaleja, joilla on suuri sähkönjohtavuus, kutsutaan puolestaan johteiksi. Kuvan 7 perusteella huonosti sähköä johtavia maalajeja näyttäisivät olevan esimerkiksi kuiva savi ja sora. Hyvin sähköä johtavat puolestaan veden kylästämä savi, turve ja lieju. Sähkönjohtavuus tarkoittaa nettovarauksen kykyä liikkua väliaineessa sähkökentän vaikutuksesta. Väliaineessa olevassa sähkökentässä liikkuvista varauksista muodostuu sähkövirta. Sähkönjohtavuusominaisuuksiensa perusteella maaperän aineet voidaan luokitella metallisiin johteisiin, puolijohteisiin, kiinteisiin eli kiteisiin liuoksiin ja nesteliuoksiin eli elektrolyytteihin. Metallisissa johteissa ja puolijohteissa varaus kulkee elektronien välityksellä. Kiteisissä liuoksissa ja nesteliuoksissa varaus kulkee ionien välityksellä. Sähkönjohtavuusominaisuuksiin perustuvia reikämittauksia voidaan tehdä monin eri tavoin. Tässä yhteydessä käsitellään suppeasti menetelmät omapotentiaalimittaus eli SP-mittaus, ominaisvastusmittaus ja latauspotentiaalimittaus sekä indusoidun polarisaation mittaus eli IP-menetelmä. (Peltoniemi 1988.)



Kuva 7. Sähkönjohtavuus ja ominaisvastus eri maalajeissa (SGY 1993).

Omapotentiaalimittauksia on käytetty metallimineralisaatioiden paikallistamiseen sekä kiven rakoilu- ja vesivirtauskohtien paikallistamiseen. Mittauksessa jännite mitataan kahden elektrodin välillä, joista toinen on maan pinnalla ja toinen reiässä. Vaihtoehtoisesti mittaus voidaan suorittaa myös kahden samassa reiässä olevan elektrodin välillä. Kun molemmat elektrodit ovat rei'issä, vältetään ulkoisilta sähköisiltä häiriötekijöiltä. Omapotentiaalimittaus on hyväksi havaittu menetelmä rakovyöhykkeiden paikallistamiseen varsinkin silloin kun reiässä oleva vesi on suolaista. (Peltoniemi 1988.)

Ominaisvastusmittaus perustuu sähkönjohtavuuden vaihteluun maaperässä. Ominaisvastusmittaus on yleinen menetelmä, koska se on luotettava ja suhteellisen helppo suorittaa. Ominaisvastuksen mittaaminen voidaan suorittaa monin eri tavoin järjestettyjen mittauselektrodien välillä. Yleisimmin käytetyt järjestelmät normaali-, lateraali-, Wenner-, yksipiste- ja fokusoitu järjestelmä on esitetty kuvassa 8. Ominaisvastusreikämittauksissa syöttövirta jakaantuu kokoavaruuteen. Virran  $I$  aiheuttama potentiaali  $V$  etäisyydellä  $r$  voidaan esittää yhtälön 12 muodossa. Tästä voidaan johtaa eri järjestelmillä suoritetuille mittauksille ominaisvastuksen määrittämiseen käytettävät yhtälöt 13–16. Yhtälö 13 on normaalijärjestelmälle, yhtälö 14 lateraalijärjestelmälle, yhtälö 15 Wenner-järjestelmälle ja yhtälö 16 yksipistejärjestelmälle. Kuvassa 8 on käytetty samoja merkintöjä kuin yhtälöissä 13–16. (Peltoniemi 1988.)



Kuva 8. Ominaisvastusmittausten elektrodijärjestelmiä. a)normaalijärjestelmä, b)lateraalijärjestelmä, c)Wenner -järjestelmä, d)yksipistejärjestelmä, e)fokusoitu järjestelmä (Poikonen & Hassinen 1982).

$$V = \frac{\rho_s I}{4\pi r_a} \quad (12)$$

missä  $V$  on potentiaali [V]  
 $\rho_s$  on väliaineen ominaisvastus [ $\Omega\text{m}$ ]  
 $I$  on virta [A]  
 $r_a$  on etäisyys virtanavasta [m]

$$\rho_a = 4\pi R_s AM \quad (\text{normaalijärjestelmälle}) \quad (13)$$

missä  $\rho_a$  on näennäinen ominaisvastus [ $\Omega\text{m}$ ]  
 $R_s$  on potentiaalın muutos jaettuna virralla [V/A]  
 $AM$  on virtanavan ja jännitenavan välinen etäisyys [m]

$$\rho_a = 4\pi R_s \frac{(AO)^2}{NM} \quad (\text{lateraalijärjestelmälle}) \quad (14)$$

missä  $AO$  on mittauspisteen ja lähimmän virtaelektrodin välinen etäisyys [m]  
 $NM$  on jännitenapojen välinen etäisyys [m]

$$\rho_a = 4\pi R_s a \quad (\text{Wenner- järjestelmälle}) \quad (15)$$

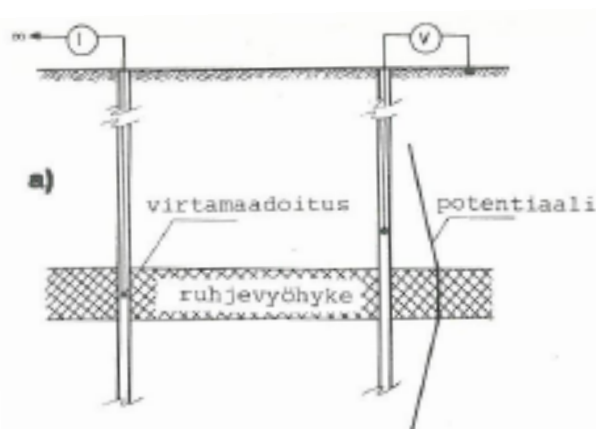
missä  $a$  on elektrodien välinen etäisyys [m]

$$\rho_a = 4\pi R_s r_e \quad (\text{yksipistejärjestelmälle}) \quad (16)$$

missä  $r_e$  on maadoituselektrodin tehollinen säde [m]

Eri ominaisvastusmittausjärjestelmillä on erilainen luotaussäde, jota voidaan muuttaa pidentämällä tai lyhentämällä elektrodien välimatkaa. Suomessa on kokeiltu mm. syviin reikiin soveltuva Wenner- järjestelmää 56 mm mittapäällä. Kokeillun laitteen erotuskyky on hyvä lyhyen 0,32 m elektrodivälin vuoksi. Lisäksi laitteen hyvä puoli on, että mittauksilla voidaan havaita korkeita ominaisvastuksen arvoja 100000  $\Omega\text{m}$  saakka. Esimerkiksi kuivan saven ominaisvastus voi kuvan 7 tietojen perusteella olla lähellä laitteen maksimiarvoa. (Peltoniemi 1988, SGY 1993.)

Latauspotentiaalityömittauksia on käytetty apuna malmitutkimuksissa ja ruhjevyöhykkeiden kartoituksessa. Latauspotentiaalityömittauksesta käytetään myös ranskankielistä nimitystä mise-à-la-masse. Sitä käytetään myös kaksireikämittauksiin, joilla voidaan havaita esimerkiksi tutkimusreikien välisten rakovyöhykkeiden jatkuvuus. Latauspotentiaalityömenetelmän periaate on esitetty kuvassa 9. Virta johdetaan elektrodien välisen materiaalin lävitse. Erot reikien välisessä materiaalissa havaitaan potentiaalin muutoksina. Potentiaali kasvaa ruhjevyöhykkeen kohdalla. (Peltoniemi 1988.)



Kuva 9. Latauspotentiaalityömittauksen periaate kallioperän ruhjevyöhykkeen tutkimisessa (Poikonen 1983).

Indusoidun polarisaation mittausta eli IP- mittausta käytetään metallisten mineralisaatioiden ja savivyöhykkeiden paikantamiseen. Menetelmällä voidaan paikantaa myös ruhje- ja heikkousvyöhykkeitä. Menetelmää on sovellettu enimmäkseen malminetsintään. Kallioperän rakennetutkimuksissa materiaalissa esiintyvät poikkeamat erottuvat heikosti korkean kohinatason vuoksi. Ydinjätetutkimuksissa IP- menetelmässä on ollut hyötyä kivilajikoostumuksen määrittämisessä, joissa muuten olisi vaadittu näytteenottoa ja laboratoriokokeita. (Peltoniemi 1988.)

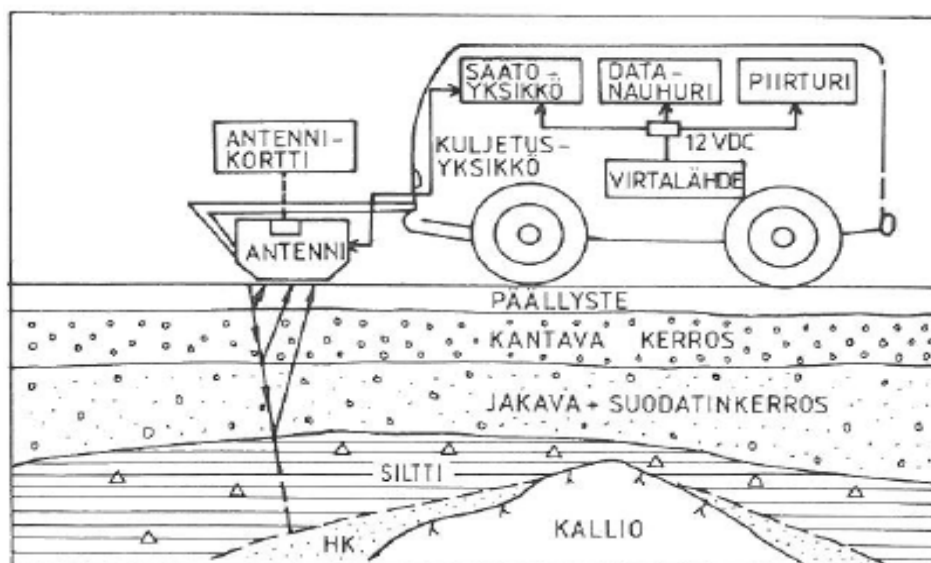
## 6.7 Sähkömagneettiset reikämittaukset

Sähkömagneettisissa mittauksissa käytetään hyväksi magneettikentän ominaisuuksia ja sähkömagneettisen aaltoliikkeen etenemistä väliaineessa. Magneettikentässä tapahtuvien muutosten mittaamiseen on kehitetty lukuisia pintamittausmenetelmiä kuten esimer-

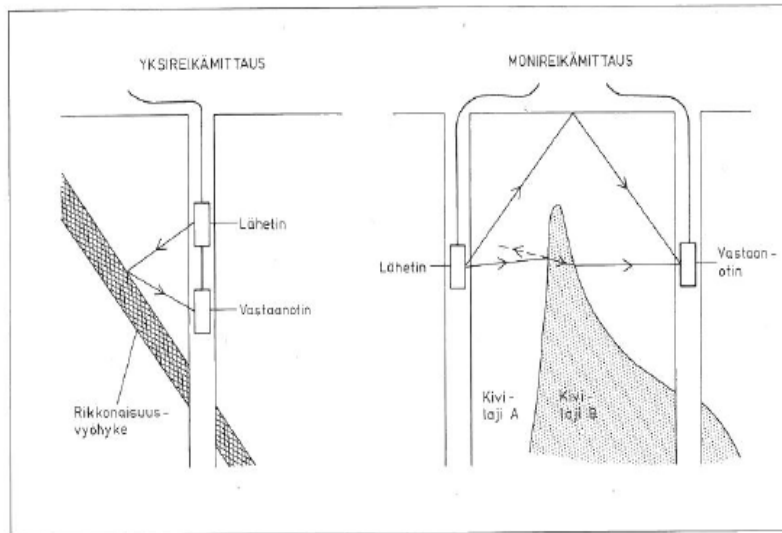
kiksi slingram, turam, VLF, sirotem ja maatutka. Sähkömagneettisilla menetelmillä on mahdollista havaita maaperässä olevia johtavuusvaihteluja, joita voidaan käyttää hyväksi malminetsinnässä. Yleisesti sähkömagneettiset menetelmät ovat suhteellisen suurimittakaavaisia eivätkä sovellu yksittäisten pienten kohteiden tutkimiseen. Maatutkaluotauksesta on kehitetty myös reikämittauksiin soveltuva laitteisto, reikäutka. Maatutkan perusmenetelmällä on mahdollista määrittää maaperän kerrosrajoja ja kerrospak-suuksia, edellyttäen että kerrosten sähköjohtavuuksien erot ovat riittävän suuret. Maatutka tunkeutuu hyvin kerroksiin joiden sähköjohtavuus on pieni. Menetelmän yleinen heikkous on sähkömagneettisen aallon nopea vaimeneminen hyvin johtavissa kerroksissa. Tästä johtuen menetelmällä saadaan huonoja tuloksia hyvin johtavien savikerrosten tai esimerkiksi betoniraidoituksen takaa. (Peltoniemi 1988.)

Maatutkaluotauksissa käytetty radiotaajuusalue on noin 20–1000 MHz. Pintamittauksissa käytetään tutkittavan kohteen mukaan taajuuksia 100–1000 MHz ja reikämittauksissa 20–80 MHz. Korkeampia yli 500 MHz taajuuksia käytettäessä saadaan parempi ohuiden kerroksien erottelukyky. Matalammilla taajuuksilla saadaan karkeampia tuloksia, mutta syvyysulottuvuus on parempi kuin korkeammilla taajuuksilla. (Hänninen et al. 1991.)

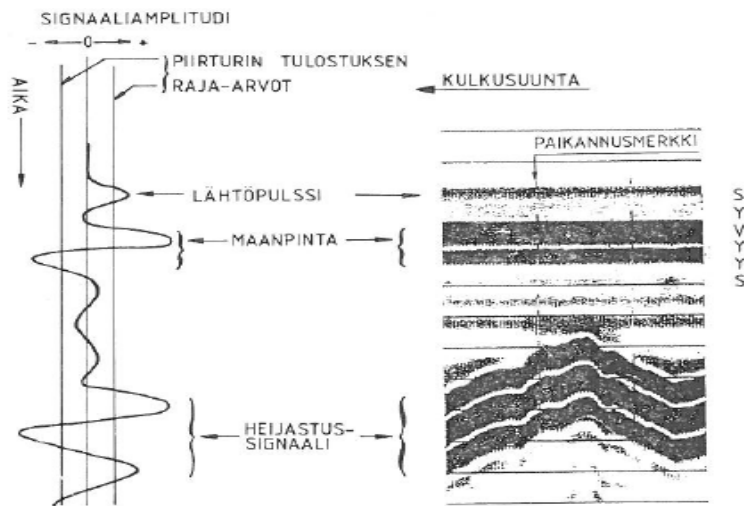
Maatutkamittauksessa lähetinantennilla suunnataan tutkittavaan kohteeseen sähkömagneettisia pulsseja, jotka muodostavat väliaineeseen sähkömagneettisia aaltoja. Kohteessa olevilta sähköisiltä rajapinnoilta osa aaltojen energiasta heijastuu takaisin ja osa jatkaa matkaansa syvemmälle. Takaisinheijastuneet aallot voidaan rekisteröidä vastaanotinantennilla. Vastaanotinantennin havaintojen perusteella lasketaan aallon kuluaika ja amplitudi. Maatutkamittauksen periaate on esitetty kuvassa 10 ja reikäutkamittauksen periaate kuvassa 11. Mittauksen aikana tutkalaitteistoa liikutetaan ja samalla suoritetaan mittauksia tiheässä tahdissa. Mittalaitteisto on usein kytketty tietokoneeseen, joka piirtää jatkuvan profiilin tutkittavan kohteen sähköisistä rajapinnoista jo mittauksen aikana. Kuvassa 12 on esitetty vasemmassa laidassa yksittäinen pyyhkäisy aaltoviivamuodossa ja oikeassa laidassa useista yksittäisistä pyyhkäisyistä koostuva piirturitulos, josta voidaan tulkita mahdollisia kerrosrajoja. (Hänninen et al. 1991.)



Kuva 10. Maatutkamittauksessa käytettävä laitteisto ja sen toimintaperiaate (Hänninen et al. 1991).

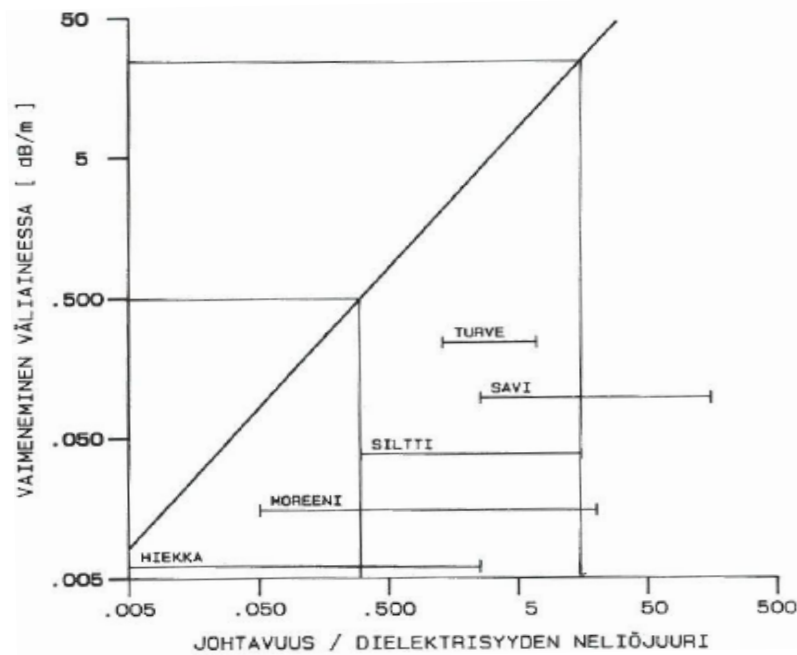


Kuva 11. Reikäutkamittauksen periaate (Hänninen et al. 1991).



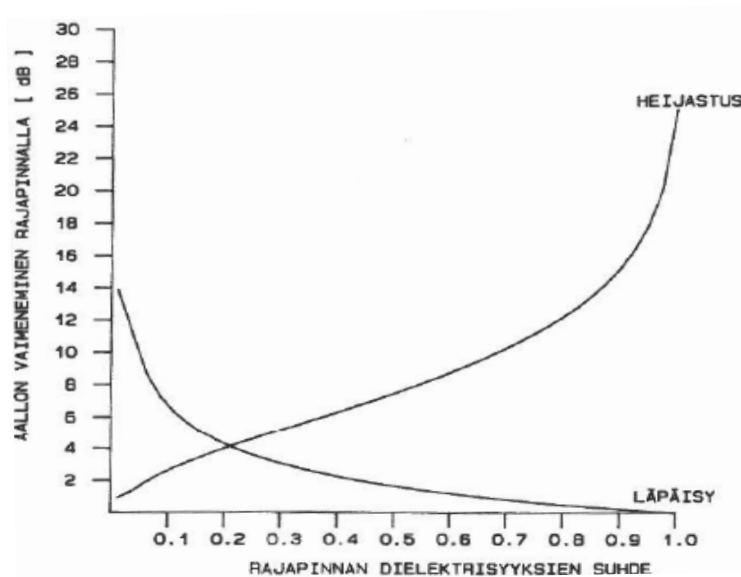
Kuva 12. Vasemmalla yksittäinen pyyhkäisy aaltoviivamuodossa ja oikealla useista yksittäisistä pyyhkäisyistä koostuva piirturitulostus (Hänninen et al. 1991).

Sähkömagneettisten aaltojen etenemisnopeuteen ja heijastumiseen rajapinnoilta vaikuttavat suurimmaksi osaksi väliaineen materiaalin dielektrisyys ja susceptibiliteetti. Dielektrisyys on kullekin materiaalille ominainen vakio, joka kertoo miten sähkökenttä vaimenee edetessään väliaineessa verrattuna sähkökenttään, joka etenee tyhjiössä. Aallon vaimenemiseen vaikuttaa myös väliaineen sähkönjohtavuus, joka ei puolestaan vaikuta juurikaan heijastumiseen. Sähkömagneettisen aallon vaimenemista eri maalajeissa on havainnollistettu kuvassa 13. Aalto vaimenee tehokkaimmin turpeessa ja savessa, joilla on suuri johtavuus. (Hänninen et al. 1991.)



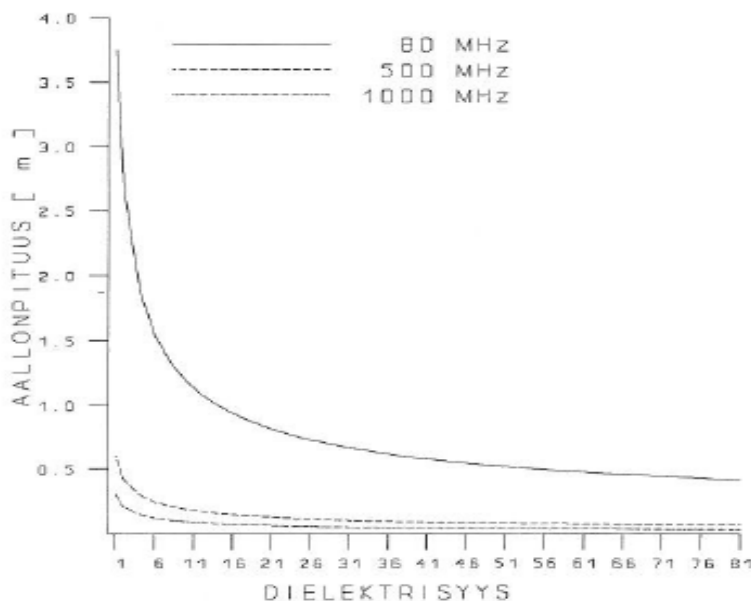
Kuva 13. Sähkömagneettisen aallon vaimenemisen suhde johtavuuden ja dielektrisyyden neliöjuuren suhteeseen (Hänninen et al. 1991).

Väliaineessa tapahtuvan vaimenemisen lisäksi sähkömagneettinen aalto vaimenee jokaisella rajapinnalla. Rajapinnalla aalto jakautuu läpäisevään ja heijastuvaan osaan sen mukaan kuinka suuri ero on rajapinnalla kohtaavien väliaineiden dielektrisyysissä. Kuvassa 14 on esitetty rajapinnan dielektrisyysien suhteen vaikutus aallon vaimenemiseen sekä läpäisyn ja heijastuksen suhteeseen. Kun kuvassa 14 rajapinnalla kohtaavien väliaineiden dielektrisyysien suhde on 1, rajapintaa ei käytännössä ole. Tällöin pulssin energia menee kokonaisuudessaan läpi heijastumatta. Tämä ilmiö mahdollistaa dielektrisyyseltään erilaisten kerrosten havaitsemisen sähkömagneettisen aallon liikkeeseen perustuvilla menetelmillä. (Hänninen et al. 1991.)



Kuva 14. Väliaineiden dielektrisyseron vaikutus läpäisseen ja heijastuneen pulssin voimakkuuteen (Hänninen et al. 1991).

Sähkömagneettisen aallon aallonpituudella on suuri vaikutus mittaustarkkuuteen. Aallonpituus riippuu antennin taajuudesta ja väliaineen ominaisuuksista kuvan 15 mukaisesti. Taajuutta kasvattamalla aallonpituutta saadaan pienennettyä ja saadaan tarkempia tuloksia. Vastaavasti kuitenkin tunkeutuvuus väliaineeseen heikkenee. Sopiva taajuus valitaan tutkimusongelman ja maakerrosten laadun perusteella. (Hänninen et al. 1991.)



Kuva 15. Aallonpituuden riippuvuus käytetystä taajuudesta ja väliaineen dielektrisyydestä (Hänninen et al. 1991).

Käytännön maatulokaluotauksiin liittyvissä laskutoimituksissa käytetään yleensä yhtälöitä 17–22. Laskutoimitusten yksinkertaistamiseksi väliaineen dielektrisyyden ja susceptibiliteetin yhteisvaikutusta kuvataan yleensä suurella  $\epsilon$ . Näistä susceptibiliteetin vaikutus on yleensä huomattavasti pienempi kuin dielektrisyyden. Sähkömagneettisen aallon etenemisnopeus väliaineessa voidaan laskea yhtälön 17 avulla. Yhtälöstä 17 voidaan päätellä, että aallon nopeus riippuu täysin suuresta  $\epsilon$ , kun valonnopeus  $c$  on vakio. Yhtälöä 18 voidaan käyttää rajapintojen syvyyksien määrittämiseen. Yhtälö 19 antaa heijastuskertoimen, joka kertoo kuinka paljon rajapinnalle tulevasta aaltoenergiasta heijastuu takaisin. Yhtälössä 20 esitetty läpäisykerroin puolestaan kertoo kuinka suuri osa aaltoenergiasta läpäisee rajapinnan heijastumatta takaisin. Sähkömagneettisen aallon vaimeneminen väliaineessa on suoraan verrannollinen väliaineen sähkönjohtavuuteen, mikä nähdään yhtälöstä 21. Aallonpituuden riippuvuus lähettimen taajuudesta ja väliaineen dielektrisyydestä on esitetty yhtälössä 22. (Hänninen et al. 1991.)

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}} \quad (17)$$

missä  $v$  on sähkömagneettisen aallon etenemisnopeus [m/s]  
 $c$  on valonnopeus tyhjiössä [m/s]  
 $\epsilon$  on dielektrisyyden ja susceptibiliteetin yhteisvaikutus [-]

$$S = \frac{v \times t}{2} \quad (18)$$

missä  $S$  on rajapinnan syvyys [m]  
 $t$  on kulku-aika väliaineessa [s]



$$K = \frac{(\sqrt{e_2} - \sqrt{e_1})}{(\sqrt{e_2} + \sqrt{e_1})} \quad (19)$$

missä  $K$  on heijastuskerroin [-]

$$R_L = 1 - K \quad (20)$$

missä  $R_L$  on läpäisykerroin [-]

$$A_v = \frac{1635 \times \omega}{\sqrt{e}} \quad (21)$$

missä  $A_v$  on vaimeneminen väliaineessa [dB]  
 $\omega$  on väliaineen sähkönjohtavuus [S/m]

$$I_s = \frac{1000 \times c}{(f \times \sqrt{e})} \quad (22)$$

missä  $I_s$  on aallonpituus [m]  
 $f$  on taajuus [MHz]

## 6.8 Radiometriset reikämittaukset

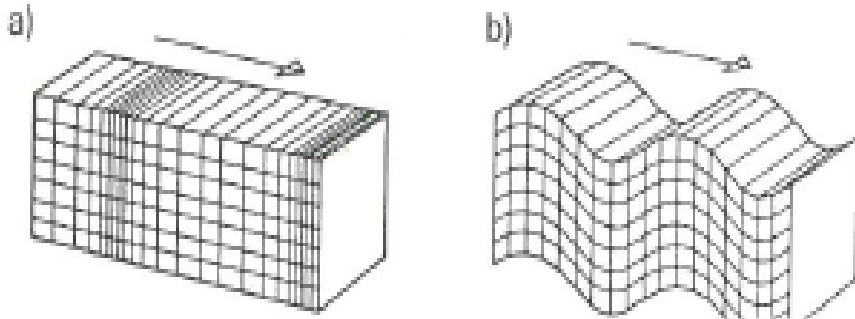
Radiometrisiä reikämittauksia voidaan käyttää materiaalin tiheyden mittaamiseen. Kaliummittauksilla voidaan arvioida esimerkiksi rakovyöhykkeissä esiintyvien savitäytteidien laatua savipitoisuuden perusteella. Yleisimmät menetelmät perustuvat neutronsäteilyn tai gammasäteilyn takaisinsirontaan. Mittalaitteilla voidaan mitata joko luonnon omaa säteilyä tai keinotekoisella säteilylähteellä aikaansaatua säteilyn takaisinsirontaa. Keinotekoiseen säteilylähteeseen perustuvista yleisistä menetelmistä käytetään nimityksiä neutron-neutron ja gamma-gamma, tuotetun säteilyn laadun perusteella. Tiheysmittaukseen käytetään yleensä gamma-gamma-mittausta. Neutron-neutron-mittaus soveltuu esimerkiksi sedimenttikivien huokoisuuden ja veden suolaisuuden tutkimiseen. (Peltoniemi 1988.)

Gammasäteilyn takaisinsironnan määrän perusteella voidaan päätellä materiaalin tiheys ja huokoisuus. Säteilylähteenä käytetään yleensä voimakasta monoenergistä gammasäteilyä säteileviä isotooppeja  $\text{Co}^{60}$  tai  $\text{Cs}^{137}$ . Säteilyn ilmaisimena käytetään joko tuikelaskinta tai geigerputkea. Säteilyn määrä mitataan pulsseina (cps). Pulssien lukumäärästä saadaan tiheys kohdekohtaisen kalibroitimen avulla. Kertoimen arvo riippuu reiän halkaisijasta ja käytettävästä väliaineesta, joka voi reiässä olla esimerkiksi vettä tai ilmaa. Kun käytetään oikein kalibroitua anturia, saadaan suoraan anturin gammalähteen ja ilmaisimen välillä olevan väliaineen tiheys. Kivilajivaihteluiden lisäksi tiheysarvoihin vaikuttavat materiaalin huokoisuus ja rikkonaisuus. Radiometrinen mittaus on suhteellisen nopea suorittaa. (Peltoniemi 1988, Tarvainen 2011.)

## 6.9 Seismiset reikämittaukset

Seismisillä reikämittauksilla voidaan selvittää materiaalien elastisia ominaisuuksia lähettimeltä vastaanottimelle kulkevien seismisten aaltojen nopeuksien ja aaltomuodon perusteella. Elastisten ominaisuuksien määrittämiseksi tarvitaan yleensä myös materiaalin tiheys, jota seismisillä menetelmillä ei voi mitata. Tiheyden mittaamiseksi samasta reiästä voidaan tehdä esimerkiksi radiometrinen mittaus. Seismiset aallot ovat pitkittäisenä tai poikittaisena aaltoliikkeenä materiaalissa eteneviä mekaanisesti luotuja häiriöitä. Pitkittäinen P-aalto pyrkii muuttamaan kappaleen tilavuutta ja poikittainen S-aalto

kappaleen muotoa. Kuvassa 16 on havainnollistettu P- ja S- aaltojen kulkua materiaalis-  
sa. P- ja S- aallot ovat runkoaaltoja, joita mittauksissa yleensä käytetään. Materiaalin  
rajapinnoilla esiintyy myös pinta-aaltoja, joiden käyttö on harvinaisempaa. (Okko  
1992.)



Kuva 16. Massapartikkeleiden liike runkoaaltojen a) P- aallon ja b) S- aallon vaikutuk-  
sesta (Peltoniemi 1988).

Runkoaaltojen etenemisnopeus eli vaihenopeus on vakio yhtälön 23 mukaisesti. Seismi-  
sen aallon nopeus materiaalis- riippuu sen tiheydestä ja kimmovakioiden arvoista.  
Kimmoteorian avulla on johdettu runkoaaltojen etenemisnopeuksien ja puristuskerto-  
imen välille yhtälöissä 24–26 esitetyt yhteydet. Puristuskertoimen ja kimmokertoimen  
välille on puolestaan esitetty yhtälön 27 mukainen yhteys. Laboratoriomittauksilla saa-  
daan määritettyä kimmokertoimelle staattista tilaa vastaava arvo. In-situ mittauksilla  
saadaan määritettyä kimmokertoimen dynaaminen arvo, kun materiaalin tiheys tunne-  
taan. P- ja S-aaltojen sekä tiheyden avulla saadaan laskettua dynaamisen kimmokerto-  
imen arvo käyttämällä yhtälöä 28. Vastaavasti runkoaaltojen avulla saadaan Poissonin  
luvun dynaaminen arvo määritettyä yhtälöllä 29. (Peltoniemi 1988.)

$$v = f\lambda \quad (23)$$

missä  $v$  on aallon nopeus [m/s]  
 $f$  on taajuus [Hz]  
 $\lambda$  on aallonpituus [m]

$$v_p = \sqrt{(K + \frac{4}{3}\mu)/\rho} \quad (24)$$

missä  $v_p$  on pitkittäisen aaltoliikkeen nopeus [m/s]  
 $\rho$  on tiheys [kg/m<sup>3</sup>]

$$v_s = \sqrt{\mu/\rho} \quad (25)$$

missä  $v_s$  on poikittaisen aaltoliikkeen nopeus [m/s]

$$v_p \cong 1,7v_s \quad (26)$$

$$E = 9K\mu/(3K + \lambda) \quad (27)$$

$$E_{dyn} = \frac{\rho v_s^2 [3(\frac{v_p}{v_s})^2 - 4]}{(\frac{v_p}{v_s})^2 - 1} \quad (28)$$

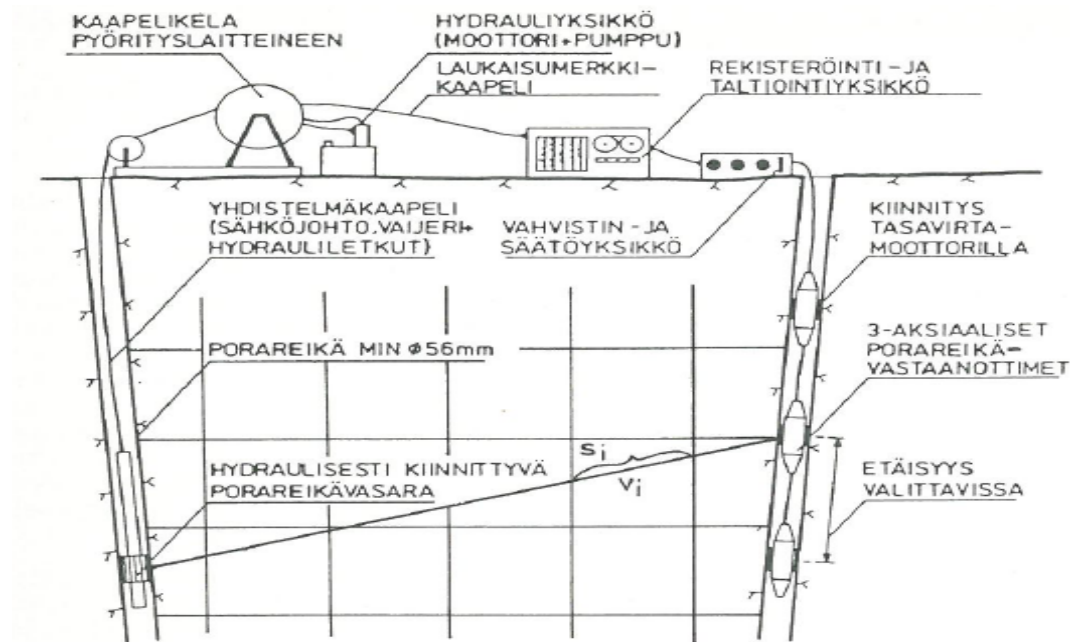
missä  $E_{dyn}$  on kimmokertoimen dynaaminen arvo [Pa]

$$v_{dyn} = \frac{\frac{(v_p/v_s)^2 - 1}{2}}{(v_p/v_s)^2 - 1} \quad (29)$$

missä  $v_{dyn}$  on Poissonin luvun dynaaminen arvo [-]

Mittaukset voidaan tehdä yksireikämittauksina ns. down-hole- menetelmillä DH tai monireikämittauksina ns. cross-hole- menetelmillä CH. DH- menetelmässä sekä lähetin että vastaanotin lasketaan kuivaan tai vesitäytteeseen reikään. Mittauksella pyritään selvittämään seismisen aallon nopeus ja aaltomuoto reiän syvyyden funktiona. Menetelmällä saadaan tietoa reiän läheisyydestä muutaman kymmenen senttimetrin etäisyydelle. Mittauksia voidaan tehdä myös muunnosmenetelmillä, joissa lähettimestä ja vastaanottimesta vain toinen sijaitsee reiässä. Ensimmäisessä muunnoksessa lähetin sijaitsee reiässä ja vastaanotin maan pinnalla, jolloin esim. irtomaapeite voi rajoittaa saatavan tiedon määrää ja laatua. Toisessa muunnoksessa lähetin sijaitsee maan pinnalla ja vastaanotin reiässä. Jälkimmäisestä menetelmästä käytetään joissain yhteyksissä nimitystä seisminen pystyprofilointi eli VSP, jota on käytetty hyväksi mm. öljynetsintäseismissä todellisten kerrosnopeuksien määrittämiseen. (Peltoniemi 1988).

CH- menetelmässä P- ja S- aaltojen etenemistä mitataan porareikien välillä. Toiseen reikään asetetaan lähetin ja toiseen vastaanotin. Kuvassa 17 on esitetty seismisen kaksireikäluotauksen periaate. Oheista laitetta käytettäessä lähettimelle tarvitaan vähintään 56 mm reikä ja vastaanottimelle vähintään 46 mm reikä. Lisäksi reikien on oltava alle 200 m etäisyydellä toisistaan.



Kuva 17. Seisminen kaksireikämittaus. (Cosma et al 1984).

Seismisissä mittauksissa lähetin voidaan säätää painottamaan S-aallon komponenttia, jolloin P- aalto jää heikommaksi. Tulkintaa voidaan helpottaa ja signaali- kohinasuhdetta parantaa pinoamalla yksittäisiä signaaleja. Yleensä tällä menetelmällä tarkastellaan vain aallon etenemisnopeutta, johon löytyy helposti tulkinta- ja hyväksikäyttömenetelmiä. Kuvan 17 mukaisessa tilanteessa kokonaiskulku aika reikien välillä voidaan määrit-

tää yhtälöllä 30. Lisäinformaatiota tarkasteltavasta rakenteesta voidaan saada tarkastelemalla myös aallon amplitudia ja vaihetta. (Peltoniemi 1988).

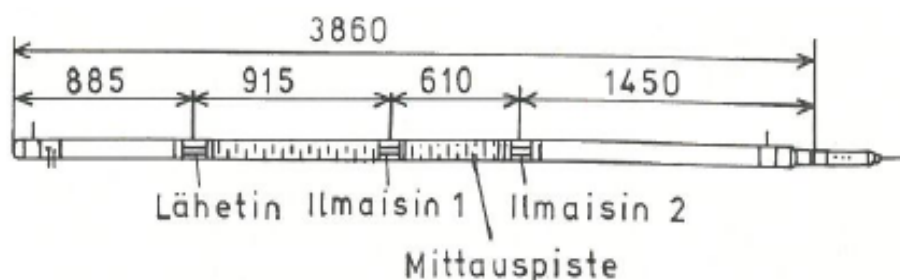
$$T = \frac{S_1}{v_1} + \frac{S_2}{v_2} + \dots \frac{S_n}{v_n}, \quad (30)$$

missä,  $T$  on kokonaiskulkuaika reikien välillä [s]  
 $S$  on lähettimen ja vastaanottimen välinen etäisyys [m]

### 6.10 Akustiset reikämittaukset

Akustisia menetelmiä voidaan käyttää seismisten mittausten tapaan mm. kallion rakoilun ja kimmo-ominaisuuksien selvittämiseen (Peltoniemi 1988). Akustinen reikämittaus muistuttaa seismisiä reikämittauksia ja tutkamittauksia. Akustisissa mittauksissa käytetään hyväksi samaa runkoaaltojen liikettä selittävää aaltoteoriaa kuin seismisissä mittauksissa. Seismisiin mittauksiin erona on käytetty taajuusalue. Akustisissa mittauksissa taajuusalueen tulee olla ääni- tai ultraäänialueella. Eri lähteissä ilmoitetut yleiset taajuusalueet poikkeavat hieman toisistaan. Peltoniemi ilmoittaa taajuusalueeksi 5 – 40 kHz. Okko & Hassinen puolestaan ilmoittavat taajuusalueeksi 10 – 100 kHz (Okko & Hassinen 1992). Myös Tarvainen ilmoittaa taajuudeksi 10 – 100 kHz (Tarvainen 2011). Mittauskäyttöä varten säädetty taajuus riippuu mittauslaitteen käyttötarkoituksesta, mitausolosuhteista sekä laitteen ominaisuuksista ja säätömahdollisuuksista.

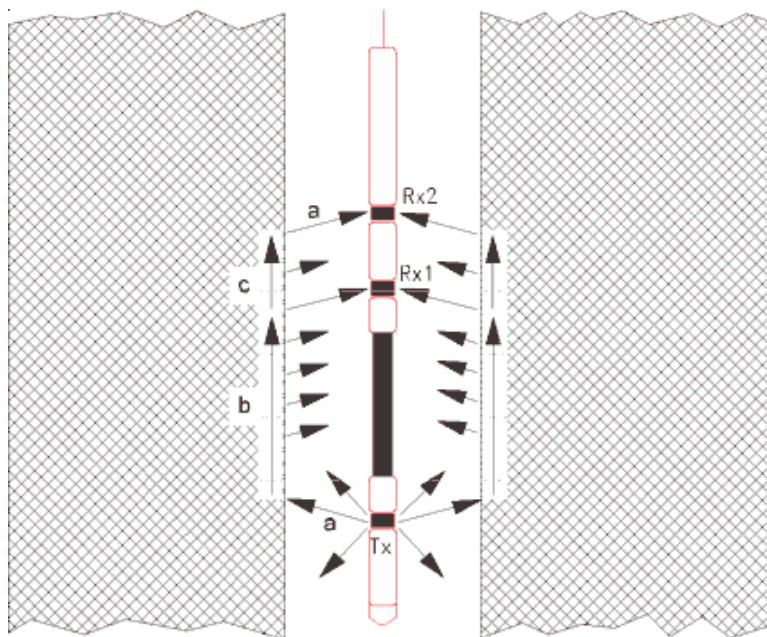
Suomessa on kokeiltu erilaisia akustisia reikämittauslaitteita kallio- ja sedimenttitutkimuksiin. Kuvassa 18 on esitetty perinteinen akustinen reikäluotausanturi, jossa on yksi lähetin ja kaksi vastaanotinta. Kyseisessä luotausanturissa lähetin sijaitsee vastaanottimien yläpuolella. Lähettimen ja vastaanottimien keskinäinen järjestys ja sijainti voi vaihdella eri laitteistoissa käyttötarkoituksen mukaisesti. Kuvan 18 tyyppisellä laitteistolla lähetetään tutkittavaan kohteeseen lyhyinä pulsseina elastista aaltoa, joka on taajuudeltaan 22 kHz. Pulssit vastaanotetaan kahdella vastaanottimella, joihin saapuvien signaalien aikaerosta voidaan laskea aaltojen kulkuaika. Aaltojen etenemiseen ja kulkuaikaan vaikuttavat mm. tutkittavan materiaalin rakenne, huokoisuus, rakoilu ja elastiset ominaisuudet. (Peltoniemi 1988.)



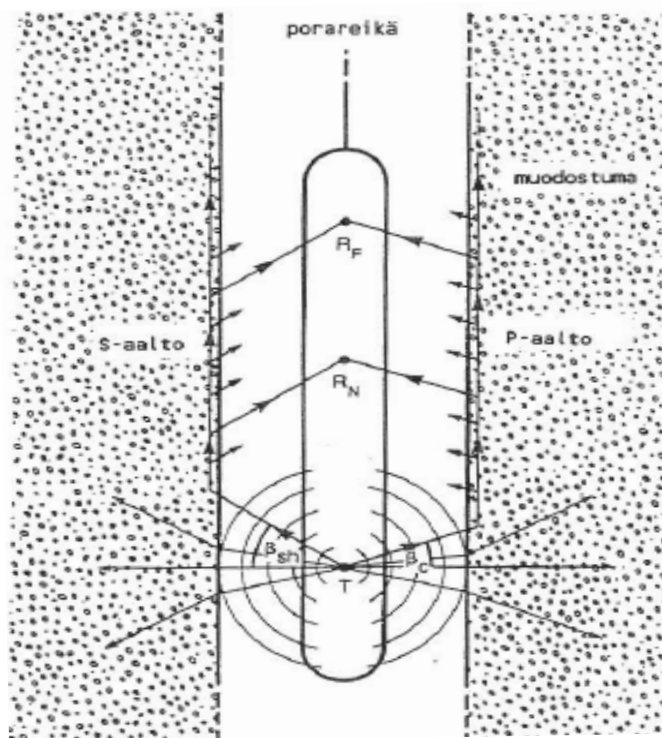
Kuva 18. Akustinen luotain (Salminen 1986).

Akustinen mittaus suoritetaan reiässä, johon luotausanturi on keskitetty mahdollisimman tarkasti. Kuvissa 19 ja 20 on esitetty periaatekuva uudenaikaisemmasta akustisesta mittauslaitteesta, jolla tehdään mittauksia vesitäytteisestä reiästä. Kuvien 19 ja 20 merkintä  $T$  tarkoittaa lähetintä ja  $R$  vastaanotinta, nuolilla on osoitettu  $P$ - ja  $S$ -aaltojen liikeradat. Tämän tyyppisessä laitteessa vastaanottimet sijaitsevat lähettimen yläpuolella. Joillain akustisilla luotaimilla pystytään tekemään mittauksia myös kuivista rei'istä. Luotaimen keskittäminen reikään tapahtuu tarkoitukseen suunnitelluilla erityisillä kiinteillä ohjainkappaleilla tai jousiohjureilla. Ohjainkappaleiden tarkoituksena on keskittää

mittaussanturi mahdollisimman keskelle reikää, jolloin mittaustulokset ovat luotettavampia. Kiinteä ohjainkappale on luotettavampi, mutta edellyttää reiän tarkan halkaisijan tuntemista etukäteen. Jousiohjureita käytetään, kun reiän halkaisija vaihtelee paljon. Akustisessa luotaimessa käytetään lähettimenä korkeataajuuksista pietsokidettä, joka lähettää reiässä olevaan veteen pitkittäisiä P-aaltoja. Reikämittauksissa nesteen läpi etenee vain P-aalto, mikä kuitenkin reiän seinämän kohdatessaan siroaa P- ja S- aalloiksi sekä veden ja reiän seinämän välistä rajapintaa pitkin eteneväksi pinta-aalloksi. (Okko & Hassinen 1992).



Kuva 19. Akustinen luotain (Geological Survey of Canada).

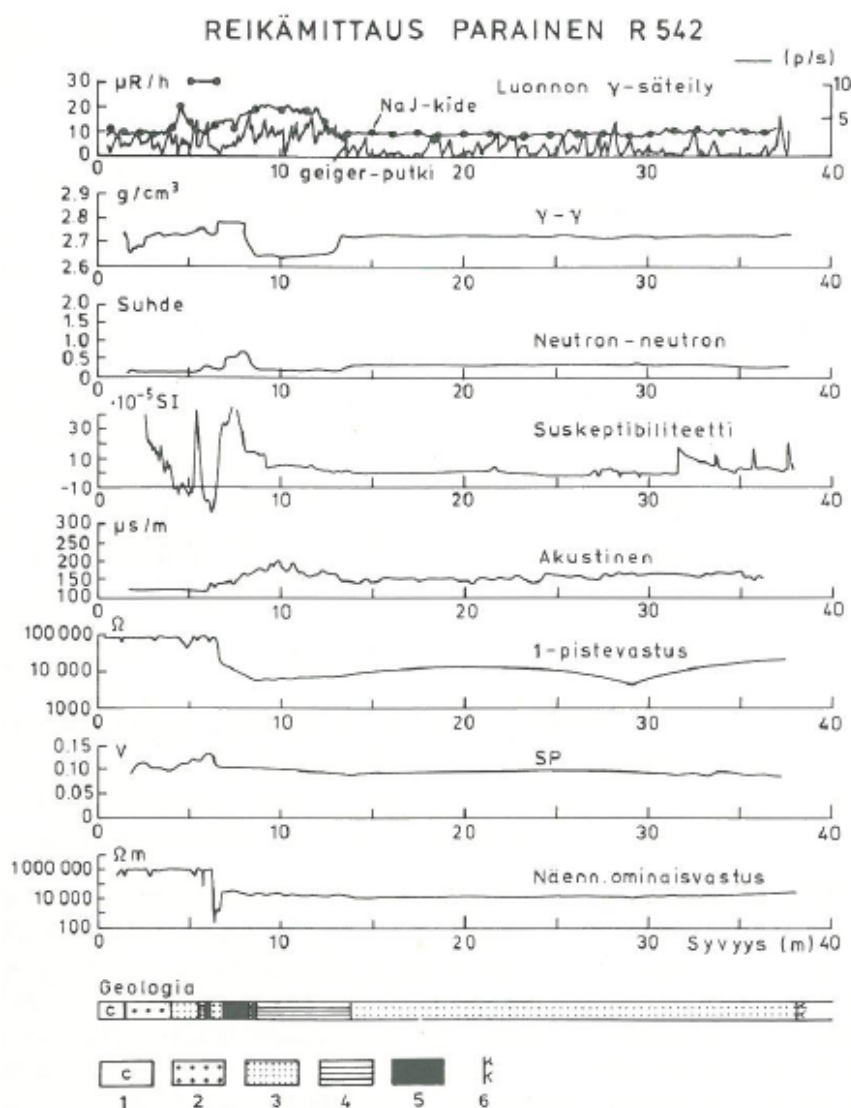


Kuva 20. Akustinen luotain (Ellis 1987).

### 6.11 Kahden menetelmän yhdistäminen

Geofysikaaliset reikämittausmenetelmät eivät yleensä anna suoraan haluttua materiaaliominaisuutta, vaan tulos saadaan epäsuorasti apusuureiden välisten yhteyksien kautta (Peltoniemi 1988). Yksittäisellä geofysikaalisella menetelmällä saadaan vain viitteellistä tietoa kohteesta. Tiedon käyttökelpoisuutta voidaan parantaa mittaamalla samassa kohteessa kahta tai useampaa eri suuretta. Eri suureiden mittaamiseen käytettävät anturit ovat yleensä suunnilleen samankokoisia ja samanmuotoisia, joten mittausten tekeminen samasta reiästä on käytännössä mahdollista. Kuvassa 21 on esitetty esimerkkitulostus kohteesta, jossa samasta reiästä on tehty useita erilaisia mittauksia.

Apumenetelmänä voidaan käyttää myös muita kuin geofysikaalisia menetelmiä, jos se on mahdollista ja taloudellisesti järkevää. Geofysikaalisten mittausten vertailutietoa voidaan kerätä esimerkiksi maanäytteenotolla ja erilaisilla kairausmenetelmillä. Erilaisiin tarkoituksiin on kehitetty laitteita, joilla voidaan samanaikaisesti sekä kairata että tehdä geofysikaalinen mittaus. Yhdistelmälaitteiden prototyyppejä on kokeiltu runsaasti, mutta niitä ei ole otettu laajempaan käyttöön.



Kuva 21. Esimerkkitulostus usean menetelmän yhdistämisestä (Salminen 1986).



## **6.12 Arvio reikämittausmenetelmien soveltuvuudesta - menetelmän valinta**

### **6.12.1 Magneettiset, sähköiset ja sähkömagneettiset menetelmät**

**Magneettisissa** menetelmissä mittausturrit ovat suurehkoja ja yleisesti käytetyt sovelukset ovat paremmin pintamittauksiin soveltuvia. Magneettisilla mittauksilla määritetään suureita, jotka kuvaavat huonosti lujuutta ja homogeenisuutta. Ne soveltuvat huomattavasti paremmin alkuperäiseen tarkoitukseensa eli malmitutkimuksiin. Tiheyden mittaukseen on kuitenkin olemassa helpompia menetelmiä. Teorian ja kokemusten perusteella arvioitiin, että magneettiset menetelmät eivät tämänhetkisellä tekniikalla sovelu syvästabiloinnin laadunvalvontaan.

**Sähköisillä** menetelmillä voidaan todennäköisesti havaita vesipitoisuuden vaihtelu pila- rissa. Erittäin tarkkoilla reikämittauslaitteilla voidaan mahdollisesti havaita esimerkiksi heikkousvyöhykkeet ja pilarirakenteen rajat. Pilarin ja saven rajapinnan havaitseminen voi kuitenkin olla hankalaa, koska pilarin ja saven vesipitoisuudet ovat hyvin lähellä toisiaan. Vesipitoisuuden erot liittyvät sähköisillä menetelmillä havaittaviin johta- vuuseroihin. Sähköisillä menetelmillä havaittavilla suureilla kuten johtavuus ja vesipi- toisuus ei ole yhteyttä lujuuteen. Sähköiset menetelmät voisivat olla hyödyllisiä pilarin homogeenisuuden mittaamisessa. Niitä voidaan mahdollisesti käyttää myös pilarin ole- massaolon todentamiseen. Sähköisten menetelmien haittapuolena on mittausten ja tul- kinnan monimutkaisuus. Sähköisiä menetelmiä voidaan todennäköisesti jossain määrin käyttää syvästabiloinnin laadunvalvontaan. Tässä työssä niitä ei valittu käytettäväksi kenttäkokeissa, koska niillä saatavat onnistuneetkaan mittaustulokset eivät vastaa tavoit- teita. Lisäksi niiden suorittaminen ja tulkitseminen on huomattavasti hankalampaa kuin esimerkiksi perinteisten kairausmenetelmien.

**Sähkömagneettisilla** menetelmillä kuten sähkömagneettisen aaltoliikkeen etenemiseen perustuvalla reikäutkalla on tietyissä rajoissa mahdollista havaita rajapintoja kuten maakerrosrajat, kallionpinta tai pohjavesipinta. Kokemusten perusteella sähkömagneet- tinen aalto etenee hyvin huonosti savessa eikä sen liikkeen perusteella voi arvioida ma- teriaalin lujuutta. Lisäksi pilarin ja saven sähkömagneettiset ominaisuudet ovat lähellä toisiaan, joten rajapinnan havaitseminen on todennäköisesti vaikeaa. Reikäutkalla voi olla pienet mahdollisuudet arvioida pilarin homogeenisuutta ja olemassaoloa. Sähkö- magneettisen aaltoliikkeen kulkuaikaan perustuvaa reikäutkaa ei tässä työssä kannata kokeilla syvästabiloinnin laadunvalvontaan.

### **6.12.2 Radiometriset, seismiset ja akustiset menetelmät**

**Radiometrisillä** menetelmillä voidaan mitata materiaalin tiheys. Pilarireiässä tehtävään tiheysmittaukseen soveltuu hyvin esimerkiksi radiometrinen gamma-gamma- menetel- mä, jonka mittausta on suhteellisen helppo toteuttaa. Vaikka tiheys on huonosti vertailu- kelpoinen pilarin lujuuden ja homogeenisuuden määrittämisessä, sitä voidaan käyttää apumenetelmänä muille menetelmille. Tiheyden mittaaminen voi olla tarpeellista, kun kohteessa esiintyy huomattavaa tiheysvaihtelua ja tarvitaan keskimääräistä arvioitua tiheyttä tarkempi tiheysmäärittäminen.

**Seismisiä** menetelmiä on tutkittu runsaasti esimerkiksi Ruotsissa, niistä ole kuitenkin tullut vakiintunutta käytäntöä laadunvalvontaan. Niillä on toisinaan onnistuttu pilarimit- tauksissa havaitsemaan P- aallon lisäksi myös S- aallon nopeus, jota on verrattu puris- tinkairalla in-situ saatuihin tuloksiin ja laboratoriossa näytekalpeilla puristamalla saa- tuihin tuloksiin. Runkoaallon nopeuden perusteella on esitetty erilaisia yhteyksiä kim-

mokertoimen ja leikkausmoduulin välille. Erilaiset yhteydet vaihtelevat suuresti kohteen mukaan. Seismiset menetelmät ovat erittäin mielenkiintoisia syvästabiloinnin laadunvalvonnan kannalta, koska niillä mitattavilla suureilla on suoria yhteyksiä materiaalien lujuusominaisuuksiin. (Axelsson 2001.)

**Seismisissä** menetelmissä on lukuisia erilaisia mittaussuureita. Vastaanotin ja lähetin voivat molemmat sijaita reiässä tai toinen niistä sijaitsee maanpinnalla. Näistä käyttökelpoisempi tapa on mitata materiaalia kahden reiässä olevan anturin välillä. Jos toinen antureista sijaitsee maan pinnalla, aallon kulkumatka syvimmällä sijaitseviin antureihin on pitkä ja signaali vaimenee. Tämä rajoittaa menetelmien käyttöä syville pilareille.

Kun molemmat anturit ovat reiässä, signaali vaimenee vähemmän. Tämän työn yhteydessä ei kokeiltu seismistä mittalaitetta, jossa molemmat anturit lasketaan reikään, koska tarkoitukseen sopivaa laitetta ei löydetty. Mittausta, jossa toinen anturi on reiässä ja toinen maan pinnalla, ei suoritettu, koska samantyyppisiä kokeilumittauksia on tehty runsaasti esimerkiksi Ruotsissa (Massarsch 2005), eikä niistä ole tullut yleiseen käyttöön soveltuvaa syvästabiloinnin laadunvalvontamenetelmää.

Kahden tai useamman reiän kautta tehtävät mittaukset olisivat todennäköisesti tarkempia kuin yksireikämittaukset. Useamman reiän tekeminen kuitenkin kasvattaa huomattavasti kustannuksia. Lisäksi monireikämittauksissa voi tulla pilariin liittyviä porausteknisiä ongelmia. Reiät karkaavat helpommin pois pilarista, kun ne eivät sijaitse pilarin keskellä. Toisaalta pilarin ja saveen rajapinta ei ole riittävän säännöllinen, jotta reikä saataisiin täsmällisesti pilarin viereen, riittävän lähelle pilaria. Jos pilarin ja reikien väliin jää savea, saadaan epätarkkoja tuloksia. Monireikämittausten käyttö yksittäiselle pilarille edellyttäisi laitetekniikan kehittämistä. Tässä työssä monireikämittausta ei kokeiltu yksireikämittausta korkeampien kustannusten vuoksi. Yksittäisten pilareiden sijaan monireikämittauksista saattaisi olla hyötyä pilariseinän laadunvalvonnassa.

**Seismisiä** mittauksia voidaan tehdä myös upottamalla useita vastaanottimia ja lähettämiä pehmeään pilariin. Mittauksissa käytettävät anturit ovat nykyisin hyvin pieniä ja edullisia, jolloin niiden jääminen lujittuvaan pilariin ei aiheuta suuria kustannuksia. Kun antureita on riittävän paljon, aallon kulkumatka lyhenee ja saadaan tarkempia tuloksia. Tähän menetelmään liittyy kuitenkin työtekniisiä ja käytännöllisiä rajoitteita, jotka nostavat kustannuksia. Pehmeisiin pilareihin tehtävillä mittalaitteiden asennuksella menetetään lopputuloksen laadunvalvonnan yllätyksellisyys. Kun pilarit ovat lujittuneet, niihin ei voi enää asentaa antureita. Jotta suuren alueen laatu saadaan kattavasti todettua, anturiasentajan täytyisi käydä työmaalla useita kertoja, mikä nostaa kustannuksia. Lisäksi pilarin yläpäähän asennetut laitteet täytyisi suojata työkonien aiheuttamilta vaurioilta.

**Akustiset** menetelmät ovat lupaavia syvästabiloinnin laadunvalvonnan kannalta, koska niillä on seismisten menetelmien tapaan suoria yhteyksiä materiaalin kimmoominaisuuksiin. Akustisten menetelmien hyvä puoli ja samalla rajoittava tekijä on käytetty korkea taajuus. Korkea taajuus vaimenee väliaineessa matalaa taajuutta nopeammin. Korkeataajuusmittauksilla kuitenkin saadaan kohteesta tarkempia tietoja. Vaimeneminen ei yleensä aiheuta ongelmia, kun luotain viedään esimerkiksi reikämittauksissa kohteen sisälle tai hyvin lähelle kohdetta.

Pilariin kohdistuvista **akustisista** reikämittauksista ei ole kokemuksia. Reikämittaukseen sopiva akustinen mittalaite on olemassa, ja sen kokeileminen pilariin tehtävässä reiässä on mahdollista. Tämän työn yhteydessä päätettiin tehdä maastokoe, jossa akustista mittausta kokeillaan syvästabiloidun pilarin lujuusominaisuuksien havaitsemiseen. Mitattavat suureet ovat P- ja S-aaltojen nopeudet pilarissa. Lisäksi tehdään tiheysmäärittäys **radiometrisellä** laitteella.



## 7 Kenttäkokeet/valittujen mittausmenetelmien kuvaus

### 7.1 Mittausten suunnittelu ja mittausmenetelmät

Työn aluksi määriteltiin ne pilarin ominaisuudet, joita kannattaisi tutkia. Seuraavassa vaiheessa etsittiin sopivat menetelmät, joilla hyödyllisinä pidettyjä ominaisuuksia voitaisiin mitata. Sopivia menetelmiä voidaan vertailla esimerkiksi suorituksen helppouden, nopeuden, taloudellisuuden ja hyödyllisyyden perusteella. Seuraavassa vaiheessa selvitettiin menetelmän soveltamiseen tarvittavan maastomittauslaitteiston saatavuus ja taloudellisuus. Lisäksi piti selvittää voiko laitteella tehdä mittauksia syvästabilointikentän tyyppisissä olosuhteissa. Mittausreikä ei todennäköisesti pysy kuivana vaan on ainakin osittain vesitäytteinen. Myös reiän ominaisuuden täytyi selvittää. Reiän täytyi olla mittauslaitteistolle sopivan kokoinen ja mahdollisimman siisti. Lisäksi reiän poraamisen tulisi rikkoa pilaria mahdollisimman vähän.

Kun sopivat mittaus- ja porauslaitteistot sekä niiden saatavuus ja hinta oli selvitetty, etsittiin sopiva koekohde. Maastokohteessa järjestettiin työmaakokous, jossa olivat paikalla syvästabilointiurakkaa suorittavan urakoitsijan edustaja, pilareiden geofysikaalisista mittauksista vastaava henkilö, porauksesta ja pilarin kairaamisesta vastaavan urakoitsijan edustaja sekä Helsingin kaupungin koemittauksen järjestämisestä vastaavat henkilöt. Kokouksessa neuvoteltiin reikien poraamisesta, geofysikaalisten mittausten suorittamisesta ja sopivasta koekohdasta pilarointityömaalla. Maastokohteessa järjestetyn kokouksen yhteydessä pilarointityön suorittamisesta vastaavan urakoitsijan edustaja antoi suostumuksensa kokeiden suorittamiseen ja osoitti kokeisiin sopivan alueen, joka häiritsisi mahdollisimman vähän työmaan toimintoja. Reikien poraamisesta ja pilareiden kairaamisesta vastaavan urakoitsijan edustajan ja geofysikaalisten mittausten suorittamisesta vastaavan henkilön kanssa sovittiin porareiän halkaisijasta ja poraustavasta, jolla reiät kannattaa tehdä.

Tässä työssä syvästabiloiduille pilareille tehdyillä kenttäkokeilla kerättiin aineistoa ja kokemuksia reiän poraamisesta keskelle pilaria, akustisesta kokoaaltomittauksesta, radiometrisestä gamma-gamma-tiheysmittauksesta ja pilarikairauksesta. Syvästabiloitujen pilareiden keskelle oli tavoitteena saada aikaan reikä, joka pysyisi auki noin 10 m syvyyteen saakka. Saaduista rei'istä oli tarkoitus tehdä akustisia mittauksia, joilla voidaan sopivissa olosuhteissa mitata P- ja S- aaltojen nopeudet materiaalissa. Pilarin tiheyden ja pilarissa etenevien aaltojen nopeuksien perusteella voidaan mahdollisesti arvioida pilareiden lujuutta ja homogeenisuutta.

### 7.2 Linnanpellon esirakentamiskohde

Maastomittaukset suoritettiin Linnanpellon koekohhteessa, joka sijaitsee Helsingissä Mellunkylän alueella, Mellunkylänpuron läheisyydessä. Kuvassa 22 on esitetty kartta, josta ilmenee Linnanpellon sijainti. Linnanpeltoon on suunniteltu kolme asuinkorttelia käsittävä täydennysrakennusalue, jonka pinta-ala on noin 4,4 ha. Koekohde on valittu kokeeseen sopivan maaperän, esirakentamismenetelmän ja sijainnin perusteella. Kokeen suorittamisen kannalta edullista oli myös kohteen suuri koko. Suuremmassa kohteessa koetta varten on helpompi varata sopiva aikaikkuna ja koepisteet siten ettei tarpeettomasti häiritä työmaan toimintaa.



Kuva 22. Linnanpellon sijainti (Opaskartta, Helsingin kaupunki).

Linnanpellon kohteessa asuinrakennukset ja katu perustetaan paaluilla kantavan pohjaan varaan, jolloin paalupituus on noin 17 - 23 m. Alueen käytönaikaisten painumien ehkäisemiseksi savikko esirakennetaan. Alueen suunnittelun yhteydessä tehtiin kustannuksiin ja tarvittavaan aikaan perustuva vertailu kahden esirakentamismenetelmän välillä. Vertailussa olivat mukana pystyjoitus ylipenkereellä ja syvästabilointi. Vertailulaskeelmien perusteella hinnaltaan edullisemmaksi vaihtoehdoksi osoittautui pystyjoitus, noin 2,3 M€ Alueen syvästabiloinnin hinnaksi arvioitiin noin 5,0 M€ Syvästabilointi valittiin alueen esirakentamismenetelmäksi, koska se on huomattavasti nopeampi menetelmä. (Honkaniemi 2007.)

### 7.3 Koekentän maaperäolosuhteet ja stabiloituvuus

Asuinrakennukset ja kadut tulevat sijoittumaan pehmeälle savikolle. Liitteessä 5 on esitetty Linnanpellon alueelle tyypillinen kairausdiagrammi. Saven ja siltin paksuus alueella on noin 12 - 15 m. Pintakerroksena alueella on ohut humuskerros, jonka alla on noin 1 m:n kuivakuorikerros. Kuivakuorikerroksen alla on noin 4 m pehmeää savea ja liejuista savea, jonka siipikairalla mitattu leikkauslujuus on noin 7 - 13 kPa. Pehmeän savikerroksen alaosassa on koekentän alueella havaittu ohut kitkamaakerros. Kitkamaakerroksen alapuolella on noin 7 - 10 m savista silttiä, jonka siipikairalla mitattu leikkauslujuus on noin 15 - 20 kPa. Pehmeiden kerrosten alla on noin 3 - 16 m hiekkaa, jonka alla on tiivis moreenikerros tai kallio. Kairaukset ovat päättyneet alueen länsireunalla noin 16 - 22 m:n syvyyteen ja itäreunalla noin 22 - 26 m:n syvyyteen. Kalliopinnan sijaintia ei ole varmistettu porakonekairauksin.

Linnanpellon alueella on stabilointityön suunnittelun yhteydessä tehty stabiloituvuuskokeita. Stabiloituvuuskokeiden tuloksia on esitetty liitteessä 6. Stabiloituvuuskokeiden maanäytteenoton perusteella kuivakuoren alta noin 3,5 metrin syvyyteen liejuisen saven vesipitoisuus on yli 100 %. Syvemmällä maaperässä saven ja savisen siltin vesipitoisuus on selvästi pienempi ja vaihtelee noin välillä 40–65 %. Puristuskokeita varten 2-3,5 metrin syvyydestä on otettu maanäytteitä, jotka on sekoitettu sideaineen kanssa. Stabiloituvuuskokeisiin liittyvillä puristuskokeilla on saatu riittävän hyviä lujuuksia sideaineella, joka sisältää kalkkia ja sementtiä seossuhteessa 1:1. Puristuskokeiden perusteella on havaittu että sideainemäärä  $150 \text{ kg/m}^3$  on riittävä ja lujittuminen tapahtuu hyvin jo kahdessa viikossa. Liitteen 6 taulukosta huomataan myös, että 4 viikon lujuudet eivät ole merkittävästi suurempia kuin 2 viikon lujuudet. Stabiloituvuuskokeiden perusteella syvästabilointi kalkkisementillä sideainemäärällä  $150 \text{ kg/m}^3$  sopii hyvin Linnanpellon

alueelle. Linnanpellon syvästabilointikohteen keskimääräiseksi leikkauslujuusvaatimukseksi on määritetty 150 kPa (Haataja 2011). Yksittäisten pilareiden leikkauslujuus saa olla 100 kPa.

## **7.4 Reiän poraaminen**

Molempia reikämittauslaitteita ja niiden ohjainkappaleita varten, reiän piti olla sopivan kokoinen ja vesitäytteinen. Reikien poraamiseen käytettiin suhteellisen järeää kairaamiseen ja poraamiseen soveltuvaa dieselkäyttöistä kairausvaunua, jonka malli oli GM 200 GT. Liitteessä 1 on esitetty kairausvaunun tekniset tiedot. Maastokokeen kannalta merkityksellisiä ominaisuuksia olivat kairausvaunun liikuteltavuus, massa, puristusvoima ja pyöritysnopeus. Kyseisen kairausvaunun massa on noin 8 000 kg, puristusvoima 40–80 kN ja pyöritysnopeus 60/120 RPM.

Poraukseen käytettiin kierreliitoksellisia muhvitomia näytteenottoputkia, joiden ulkohalkaisija oli 75 mm ja pituus 1 m. 10–12 m syvän reiän poraamista varten tarvittiin 12 kpl sarja molemmista päistä jatkettavia putkia. Kairausvaunun leuat tuettiin maata vasten järeiden puupalkkien välityksellä, jotta kairausvaunu ei putkien ylösvetovaiheessa vajoaisi pehmeään pintakerrokseen. Kairausvaunun vajotessa putkien asento voi muuttua, mikä hankaloittaa putkien ylös vetämistä.

Kokeilureikien poraamisen suorittivat Ramboll Oy:n kairaajat 31.5.2011 ja 13–14.6.2011. Kokeilureikien sijainnit ja porausajat on esitetty liitteessä 2. Ensimmäisenä porauspäivänä harjoiteltiin reikien poraamista ja varmistettiin, että reiän tekeminen pilariin onnistuu. Jos poraaminen ei olisi onnistunut, olisi kokeiltu myös vaihtoehtoisia menetelmiä kuten porakruunua tai augerterää. Pehmeän pintakerroksen ja kuivakuoren reikään varisemisen estämiseksi, reiän yläpäähän työnnettiin halkaisijaltaan reiän kokoinen ja noin 1 metrin pituinen muoviputki, välittömästi poraamisen jälkeen.

Harjoitusreiät onnistuttiin poraamaan 10 metrin syvyyteen ja ne pysyivät auki noin 7,5 metrin syvyyteen. Edellisestä havainnosta pääteltiin että reiän pohjalle kertyy lietettä ja porasoijaa noin 2-3 metrin kerros. Varsinaisena koepäivänä pilarireiät porattiin aluksi 12 metrin syvyyteen. Kun huomattiin, että ensimmäiset kolme reikää tukkeutuivat jo 4-5 metrin syvyydellä maanpinnasta, loput reiät porattiin noin 8 metrin syvyyteen. Kahtena jälkimmäisenä koepäivänä poratut reiät pysyivät auki keskimäärin noin 4,6 metrin syvyyteen saakka. Poraamisesta ei kerätty tarkkaa tietoa, koska tarkoituksena oli saada aikaan mittauksiin sopivat reiät pilarien keskelle.

## **7.5 Akustinen mittaus**

Akustisia reikämittauksia tehtiin koekentän pilarien lujuusominaisuuksien arvioimiseksi ja vertaamiseksi toisiin mitattaviin ominaisuuksiin. Mittauksessa lähetin lähettää korkeataajuista runkoaaltoja reiässä olevan veden lävitse pilarin seinämään. Pilarin ja veden rajapinnalla aalto siroaa P- ja S-aalloiksi, jotka havaitaan vastaanottimilla. Mittalaite toimii samalla periaatteella kuin kuvassa 20 esitetty laite. Mittaussuureita olivat P- ja S-aaltojen nopeudet syvyyden funktiona. Liitteessä 3 on esitetty Suomen Malmi Oy:n geofysikaalisista mittauksista vastanneen geofyysikon raportti mittaustyön suorittamisesta ja käytetyistä mittausten menetelmistä. (Tarvainen 2011.)

Mittauksiin käytettiin luotainta ALT FWS50, kuva 23. Käytetyn laitteen tekniset tiedot on esitetty liitteessä 7. Luotaimessa oli yksi lähetin ja kaksi vastaanotinta. Pietsokeraamisen lähettimen taajuus oli mittauksissa 15 kHz. Vastaanottimet olivat 0,6 metrin ja 1,0 metrin etäisyydellä lähettimestä. Lähempänä sijaitsevasta lähettimestä käytetään

merkintää Rx1 ja kauempana sijaitsevasta merkintää Rx2. Luotaintangon halkaisija oli 50 mm. Mittauksen aikana kerätyt tiedot tallennettiin raakatiedostoon. Mittaustiedon keräämiseen käytettiin ALT:n tiedonkeruuyksikköä. Syvyysmäärittäminen tehtiin mittauksen aikana matkapyörän pulssianturin avulla, kuva 24. (Tarvainen 2011.)



*Kuva 23. Reikämittauksiin käytetty akustinen luotain.*



*Kuva 24. Matkapyörä ja pulssianturi asennettuna mittausreiän yläpäähän.*

Akustiset luotau tulokset käsiteltiin tarkoitukseen soveltuvilla ohjelmilla. WellCAD-ohjelmaa käytettiin raakatiedoston avaamiseen ja tallentamiseen SEG 2- muotoon, ReflexW- ohjelmassa käsittelyä varten. P-aallon saapumisajat poimittiin jokaisesta havaitusta aallosta automaattisella Phase Follower- työkalulla. Jos automaattinen etsintä ei



onnistunut, poiminta tehtiin manuaalisesti. Saapumisaikojen perusteella voitiin laskea aallon nopeus. (Tarvainen 2011.)

## **7.6 Radiometrinen mittaus**

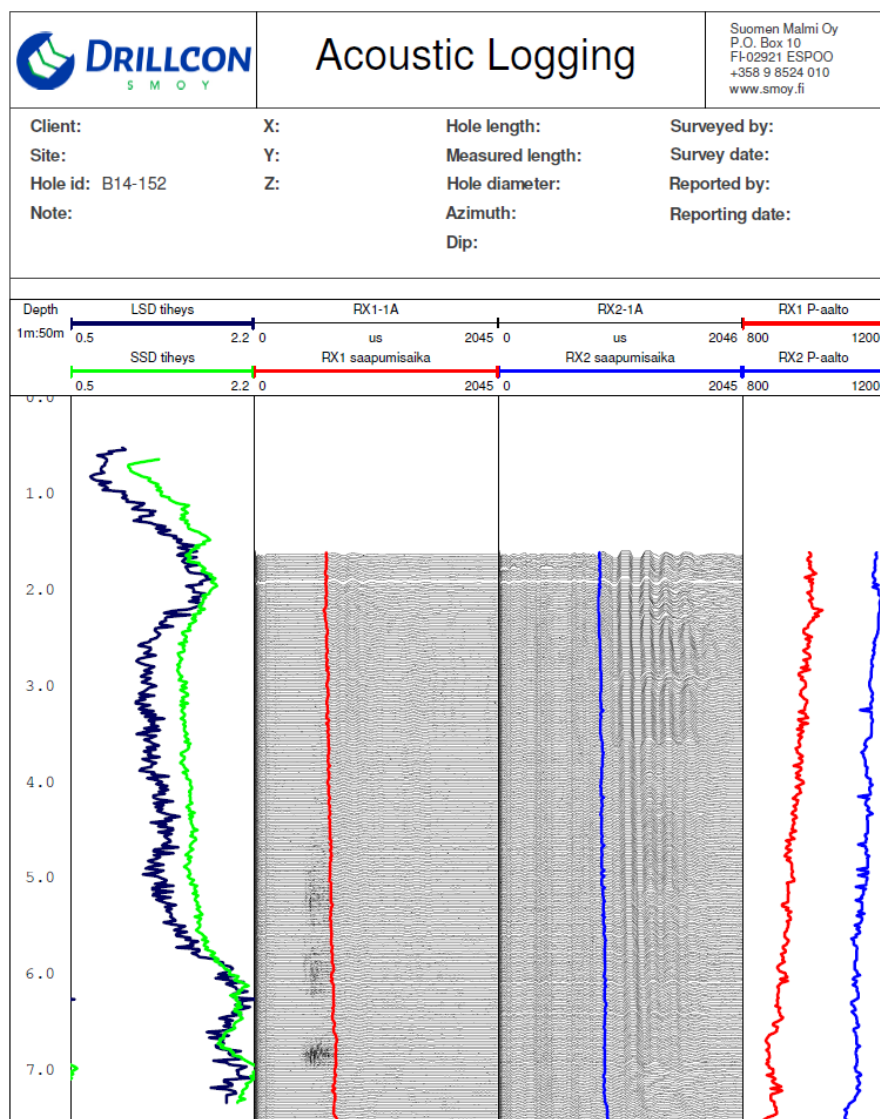
Leikkausmoduulin ja muiden kimmovakioiden selvittämiseksi oli tarpeen mitata myös materiaalin tiheys. Tiheyden määrittämiseksi rei'istä tehtiin radiometrinen gamma-gamma- luotaus Geovistan Slimhole Density- laitteistolla. Käytetyn luotaimen halkaisija on 38 mm ja säteilylähteenä oli kalibroitu 10 mCi cesium- lähde. Gamma-gamma-luotaimessakin on kaksi vastaanotinta. Lähempi on 0,11 m etäisyydellä ja kauempi 0,22 m etäisyydellä lähettimestä. Lähemmälle vastaanottimelle käytetään merkintää SSD ja kauemmalle vastaanottimelle LSD. Säteilystä mitataan pulsseina, joiden määrä muutetaan kalibroitikertoimen avulla tiheydeksi. Kalibroitikertoimen suuruus riippuu reiän koosta ja väliaineesta. Näissä mittauksissa reiän halkaisija oli 76 mm ja väliaineena oli vesi. (Tarvainen 2011.)

## **7.7 Pilarikairaus**

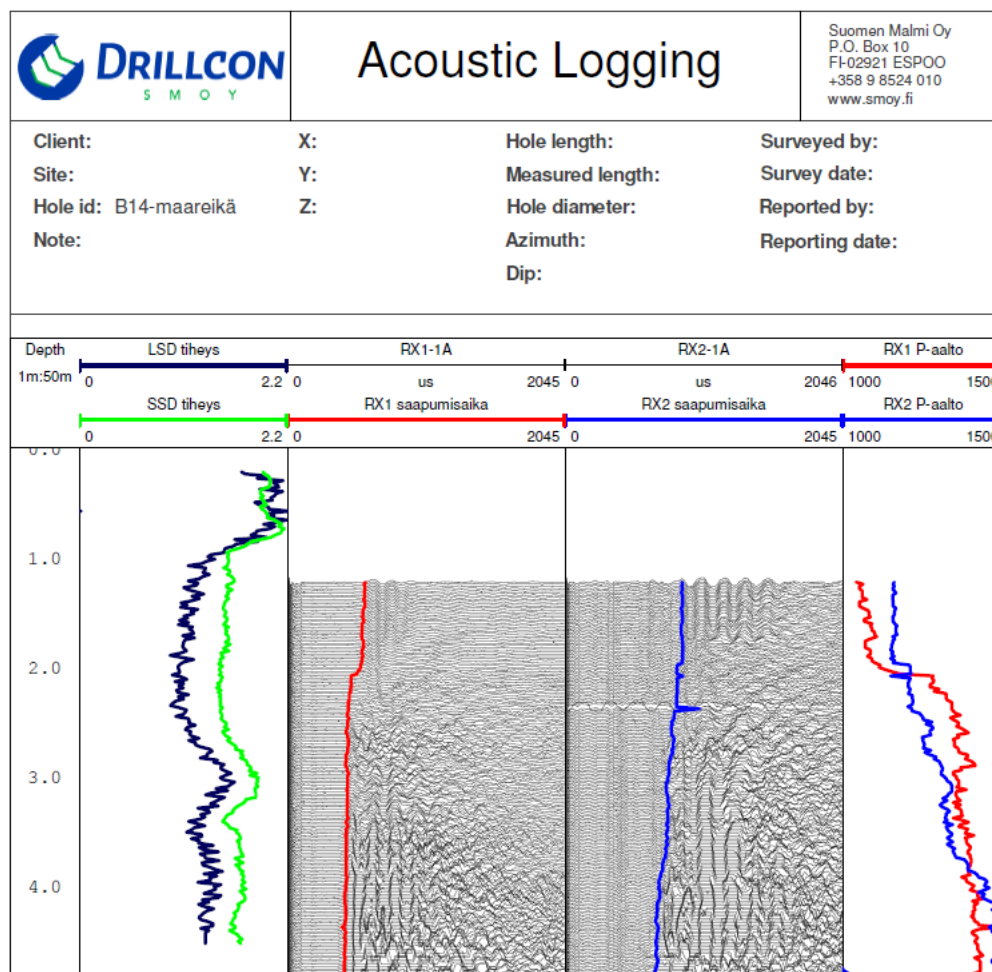
Kenttäkokeessa vertailulujuuden määrittämiseen käytettiin pilarikairausta. Kaikista poratuista mittausrei'istä, joista tehtiin akustinen ja radiometrinen mittaus, tehtiin myös pilarikairaus vertailulujuuden saamiseksi. Pilarikairauksessa mitattava suure oli kärkivastus. Ramboll Oy:n kairaaaja käytti pilarikairaukseen kuvan 4 tyyppistä, kaksisiipistä kärkikappaletta. Pilarikairaukseen käytetty kairausvaunu oli kevyempi ja helpommin liikuteltava kuin reikien poraamiseen käytetty laite. Pilarikairan kärkikappale pyrittiin upottamaan pilariin puristamalla. Kun puristaminen ei onnistunut, käytettiin heijaroimia. Esireikä oli tässä tapauksessa normaalia suurempi, joten oletettiin, että kairausvastus on hieman pienempi kuin normaalilla tavalla ilman esireikää tai halkaisijaltaan pientä esireikää käytettäessä. Maastokokeen yhteydessä tehtyjä pilarikairauksia verrataan Linnanpellon alueella tehtyjen normaalien pilarikairauksella tehtyjen laadunvalvontakairauksen tuloksiin, jotta voidaan arvioida kuinka paljon lujuus heikkenee suurempien reikien vaikutuksesta. Liitteessä 8 on esitetty tyyppillisen Linnanpellon alueella tehdyn pilarikairaussarjan leikkauslujuuskuvaaja, jossa keskimääräinen leikkauslujuus syvyysvälillä 1-5 m on noin 160 kPa.

## 8 Kenttäkokeiden tulokset

Geofysikaalisten mittausten tulokset on esitetty liitteessä 9. Liitteen 9 kuvaajissa tulokset on esitetty syvyyden funktiona. Kuvassa 25 on esitetty tyypillinen mittaustulos tiheys- ja akustisesta mittauksesta. Vasemmassa sarakkeessa on säteilylähteen suhteen lähempänä sijaitsevilla vastaanottimella (SSD) havaittu tiheys vihreällä värillä ja säteilylähteestä kauempana sijaitsevilla vastaanottimella (LSD) havaittu tiheys tummansinisellä värillä. Tiheys on ilmoitettu kuvaajassa mittayksikössä [ $\text{kg}/\text{dm}^3$ ]. Keskimmäisissä sarakkeissa on esitetty vastaanottimilla Rx1 ja Rx2 havaitun aallon muoto ja ajanhetki, jolloin P- aalto on saapunut vastaanottimelle. P- aallon saapumishetki lähettimelle Rx1 on kuvattu punaisella värillä ja lähettimelle Rx2 sinisellä värillä. Vaaka-akselilla aallon kulkuaika lähettimeltä vastaanottimelle on ilmoitettu yksikössä [ $\mu\text{s}$ ]. Oikeanpuoleisessa sarakkeessa on esitetty vastaavasti P- aallon nopeus yksikössä [ $\text{m}/\text{s}$ ], kun kulkuaika ja kulkumatka tunnetaan. Mittaus on tapahtunut 0,02 metrin välein, joten jokainen kohta syvyys suunnassa on mitattu useampaan kertaan. Kuvassa 26 on esitetty koekohteen luonnonmaassa tehtyjen geofysikaalisten vertailumittausten tulokset.



Kuva 25. Tyypillinen mittaustulos tiheysmittauksesta ja akustisesta mittauksesta (Tartvainen 2011).



Kuva 26. Geofysikaalinen vertailumittaus luonnonmaassa (Tarvainen 2011).

Mittaukset tehtiin 9 reiässä ja maareiässä. Reiässä B14-137 akustinen mittaus ei onnistunut. Muissa rei'issä P- aalto havaittiin. Liitteessä 3 (1/4) on esitetty kaikki mitatut reiät ja saavutetut mittaussyvytydet. Reikien tukkeutumisen vuoksi kohteessa ei päästy suunniteltuun 10 metrin mittaussyvytyteen. Taulukossa 8 on esitetty kaikkien reikämitaus- ja pilarikairautulosten keskiarvot. Syvyysväli 1-7 m on jaettu 1 m tarkasteluväleihin. Suluissa olevat arvot ovat maareiästä mitatut keskimääräiset arvot vastaavilla syvyysväleillä, taulukko 8. Maareikämittaus on esitetty selvyiden vuoksi myös taulukossa 9. Akustisella mittauksella oli tavoitteena saada mitattua myös S- aallon nopeus. S- aalto mittaussaineistossa ei kuitenkaan havaittu lainkaan.

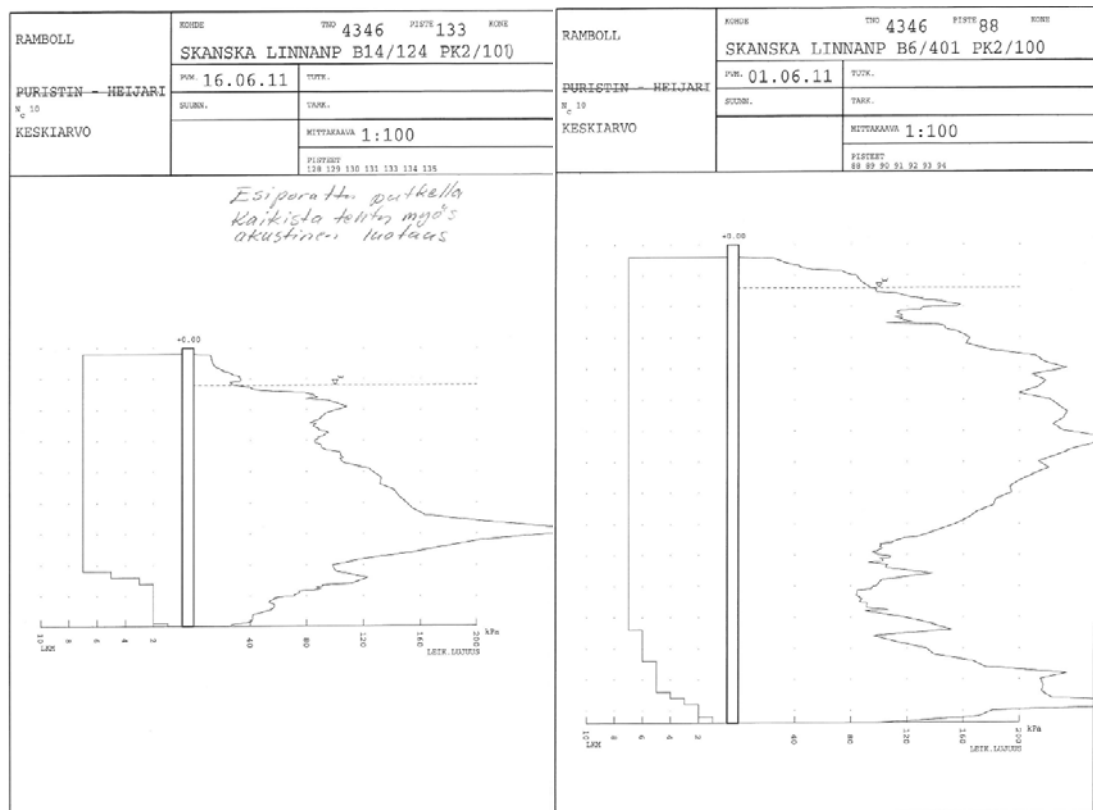
Taulukko 8. Kairausvastuksen, tiheysmittausten ja akustisten mittausten keskiarvot metrin syvyysvälein Linnanpellon koekohteessa.

syvyys [m]	kairausvastus [kN]	SSD [kg/dm <sup>3</sup> ]	LSD [kg/dm <sup>3</sup> ]	P - Rx1 [m/s]	P - Rx2 [m/s]
1 - 2	6,32 (2,24)	1.65 (1,55)	1.52 (1,18)	1006 (1077)	1168 (1160)
2 - 3	9,73 (1,94)	1.64 (1,58)	1.44 (1,20)	1003 (1327)	1171 (1245)
3 - 4	9,73 (2,12)	1.61 (1,71)	1.32 (1,37)	1003 (1376)	1166 (1348)
4 - 5	11,91 (2,43)	1.68 (1,68)	1.39 (1,35)	988 (1416)	1166 (1472)
5 - 6	17,42 (9,02)	1.80 (-)	1.66 (-)	965 (-)	1147 (-)
6 - 7	18,71 (5,60)	1.96 (-)	1.91 (-)	893 (-)	1120 (-)

*Taulukko 9. Kairausvastuksen, tiheysmittausten ja akustisten mittausten keskiarvot maareissä metrin syvyysvälein.*

syvyys [m]	kairausvastus [kN]	SSD [kg/dm <sup>3</sup> ]	LSD [kg/dm <sup>3</sup> ]	P - Rx1 [m/s]	P - Rx2 [m/s]
1 - 2	2,24	1,55	1,18	1077	1160
2 - 3	1,94	1,58	1,20	1327	1245
3 - 4	2,12	1,71	1,37	1376	1348
4 - 5	2,43	1,68	1,35	1416	1472
5 - 6	9,02	(-)	(-)	(-)	(-)
6 - 7	5,60	(-)	(-)	(-)	(-)

Pilarikairaukset tehtiin samoista rei'istä kuin geofysikaaliset mittaukset. Pilarikairaustulokset on esitetty liitteessä 10. Jokaisen reiän tuloksista on tulostettu kuvaaja, jossa on esitetty kairausvastus syvyyden funktiona. Kuvassa 27 on esitetty vasemmalla puolella tässä työssä reikämitatuille pilareille pilarikairausten perusteella määritetty keskimääräinen leikkauslujuus ja oikealla puolella tyypillinen Linnanpellon alueella tehtyjen pilarikairausten perusteella määritetty keskimääräinen leikkauslujuus. Linnanpellon alueella kokeelliseksi kantavuuskertoimeksi  $N_c$  on arvioitu 10. Kantavuuskerrointa tarvitaan leikkauslujuuden arvioimiseen pilarikairaustuloksista. Kantavuuskertoimen määrittämiseksi on suositeltavaa tehdä pilarisiipikairauksia. Linnanpellon työmaalla ei tehty pilarisiipikairauksia vaan käytettiin samantyyppisellä kairauskalustolla samantyyppisissä kohteissa käytettyä kantavuuskertoimen  $N_c$  arvoa 10.



*Kuva 27. Vasemmalla puolella on reikämittausten yhteydessä tehdyistä pilarikairauksista määritetty keskimääräinen leikkauslujuus ja oikealla puolella tyypillinen Linnanpellon alueella tehtyjen pilarikairausten perusteella määritetty keskimääräinen leikkauslujuus (Ramboll Oy).*



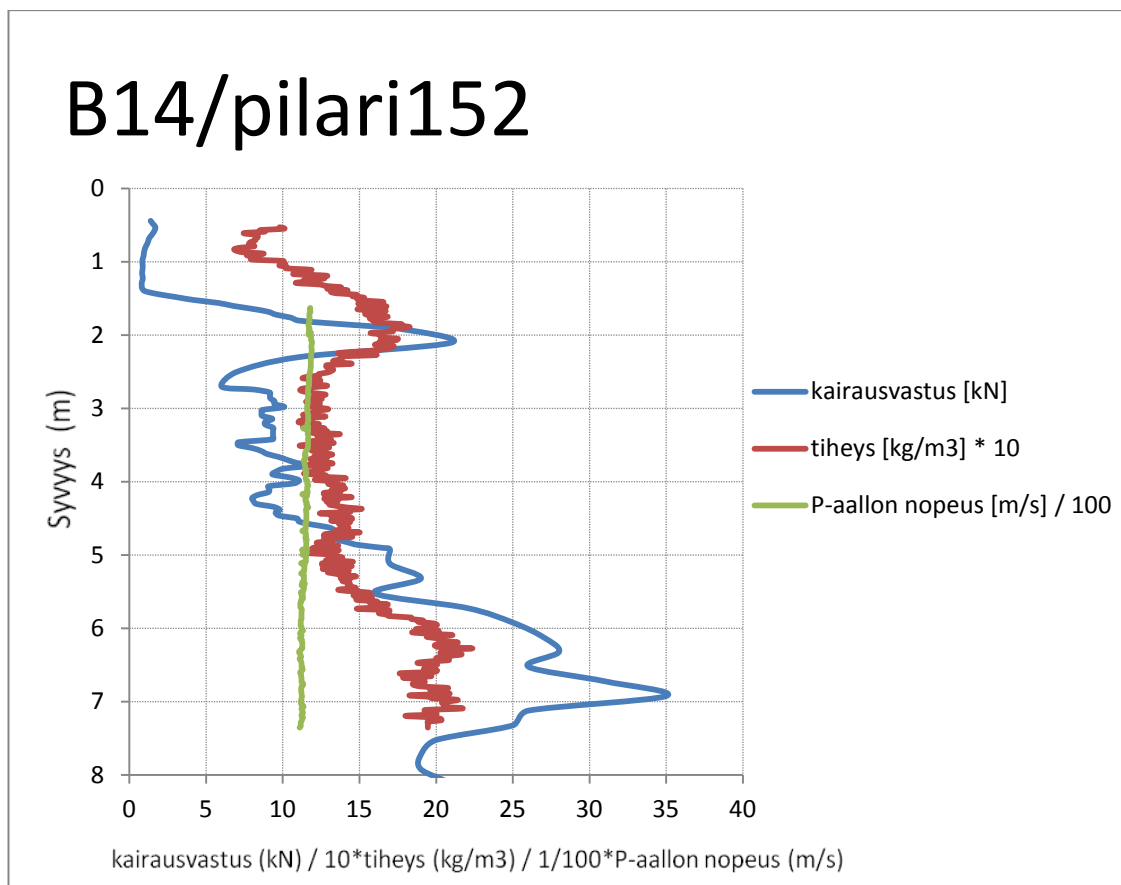
## 9 Tulosten arviointi

Akustisissa P- aaltomittauksissa vastaanottimelle Rx2 saapuneet aallot ovat voimakkaampia ja selkeämmin havaittavissa kuin vastaanottimelle Rx1 saapuneet aallot. Jos P-aallon nopeudesta tehdään jatkotulkintaa, käytetään Rx2- vastaanottimen tuloksia. Aallonnopeuden ja sen pienten vaihteluiden vuoksi P- aalto on todennäköisesti kulkenut pilarin sijaan vedessä, minkä vuoksi se ei tarjoa tietoa pilarista. Ainoa onnistunut mittaus näyttäisi olevan maareiästä, jossa P- aallon nopeus kasvaa syvyyden kasvaessa kuten sen maaperässä kuuluukin kasvaa. Pilarirei'issä P- aallon nopeus on lähes vakio ja on lähellä P- aallon kirjallisuusarvojen mukaista nopeutta 1500 [m/s] puhtaassa vedessä. Lietteisessä vedessä P- aallon nopeus on hiukan hitaampi kuin puhtaassa vedessä. Joissain pilarirei'issä on havaittavissa, että P- aallon nopeus hieman pienenee syvemmillä. Tämä todennäköisesti johtuu siitä, että liete vajoaa reiässä vähitellen syvemmälle ja pohjalla oleva vesi on lopulta lietteisempää. Liettyneen veden seisminen nopeus on pienempi kuin puhtaan veden. Tämän mittaussarjan P- aallonnopeuksia ei voi käyttää syvästabiloitujen pilareiden lujuusominaisuuksien määrittämiseen. Jos P- aallon mittaus olisi onnistunut, sen perusteella olisi voitu arvioida viitteellisesti myös S- aallon nopeus.

S- aallon mittaaminen pilarireiässä epäonnistui todennäköisesti vaikeiden mittaussuhteiden vuoksi. On mahdollista, että veden ja pilarin rajapinnalla S- aaltoa ei syntynyt, tai S- aaltojen amplitudit olivat niin heikkoja, ettei niitä havaittu. Reiässä oleva vesi oli hyvin lietteistä. Lietteisen veden ja pilarin rajapinta saattoi olla niin huomaamaton, että siinä ei tapahtunut heijastumista ja taittumista. Vaikka käytetty luotain soveltuu S- aallon mittaamiseen kallioreikä tutkimuksissa, tämän työn tulosten perusteella sitä ei voi käyttää S- aallon nopeuden mittaamiseen syvästabiloitujen pilarien reikämittauksissa.

Tiheysmittauksista saatiin onnistunutta aineistoa. Mittausten perusteella voidaan tarkastella tiheyden vaihtelua pilarissa ja verrata tuloksia kairausvastukseen. Liitteen 4 kuvaajiin on koottu kaikista mitatuista pilareista sopivia kertoimia käyttäen samaan kuvaan kairausvastus, tiheys ja P- aallon nopeus. Kuvaajissa kairausvastuksen arvo on alkupeäinen, tiheys on kerrottu kymmenellä ja P- aallon nopeus on jaettu sadalla. Esimerkiksi kuvassa 28 esitetyn pilarin B14/152 kuvaajan perusteella voidaan graafisesti päätellä, että kairausvastuksen ja tiheyden välillä on yhteys. Kun kairausvastus kasvaa, myös tiheys näyttäisi kasvavan. Kairausvastuksen muutokset tosin ovat suhteellisesti suurempia kuin tiheyden muutokset, mistä voi päätellä että kairausvastus reagoi paremmin pilarin lujuuden muutoksiin kuin tiheys. P- aallon nopeus pilarissa on lähes vakio noin 1200 m/s ja reiän pohjalla nopeus hiukan pienenee mikä voi merkitä että reiässä oleva vesi on reiän pohjan tuntumassa lietteisempää kuin lähellä maanpintaa. Reiän pohjan lietteisyys on havaittavissa erityisesti pitemmissä 6-7 m syvyyteen ulottuvissa mittaurei'issä.

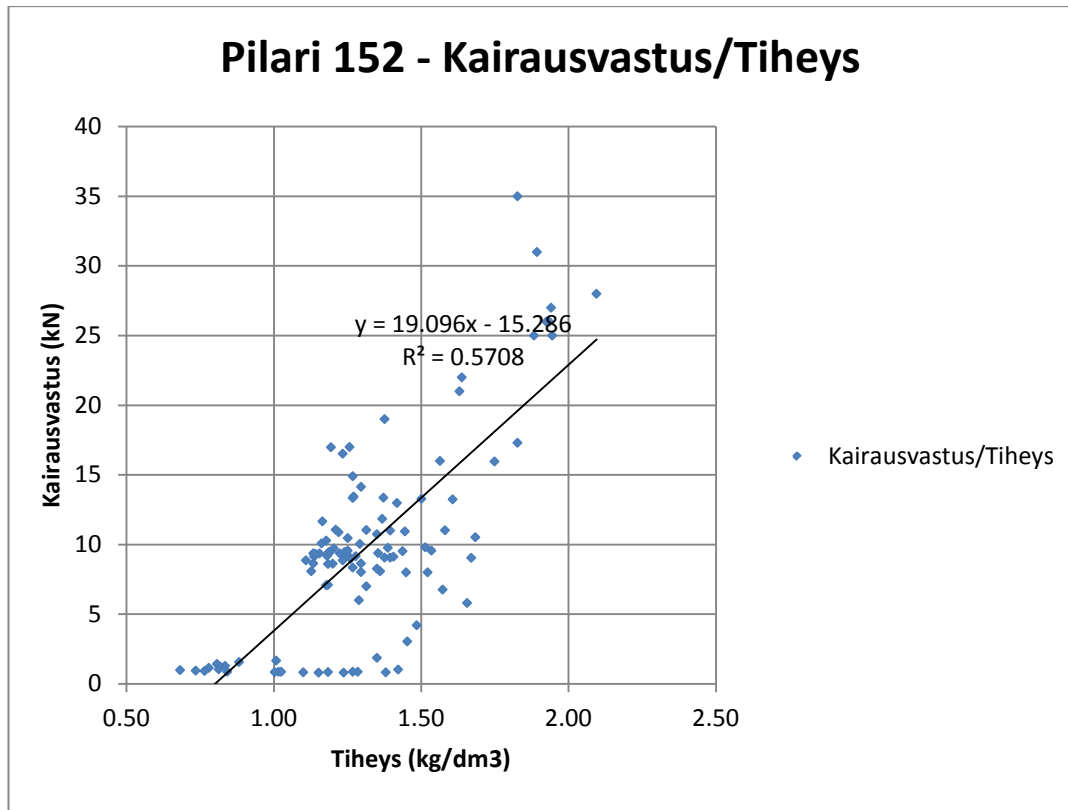
Taulukon 8 perusteella havaitaan että tiheys on syvästabiloinnin seurauksena kasvanut huomattavasti enemmän syvyysvälillä 1-3 m kuin syvyysvälillä 3-5. Kerroksessa 1-3 m alkuperäinen tiheys on hieman pienempi. Syvyysvälillä 3-5 m tiheys on säilynyt suunnilleen samana. Syvyysvälillä 1-3 m tiheys on kasvanut noin 20–25 %. Lujuuden kasvu molemmissa kerroksissa on kuitenkin suunnilleen yhtä suuri. Tämän tarkastelun perusteella suurempi tiheyden kasvu ei johda suurempaan lujuuden kasvuun.



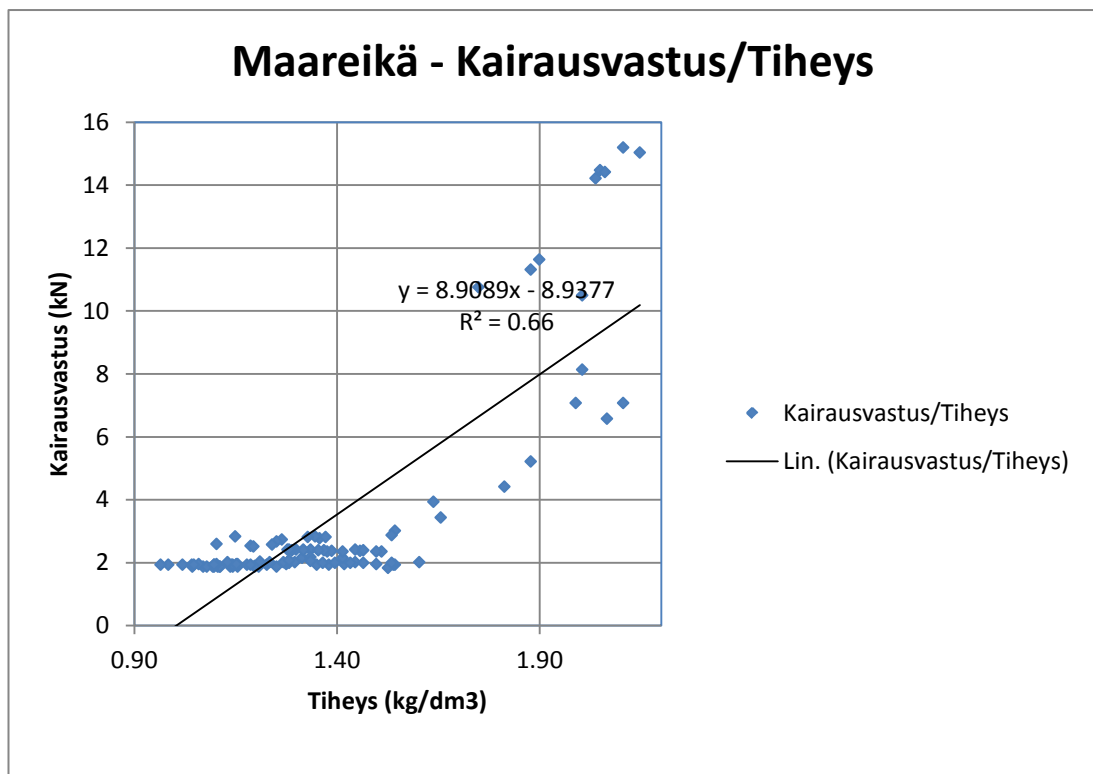
Kuva 28. Kairausvastus ja tiheys syvyyden funktiona.

Kuvassa 29 on esitetty regressioanalyysin tulos pilarin B14/152 kairausvastukselle ja tiheydelle. Tässä yksittäisessä pilarissa on melko hyvä lineaarinen korrelaatio kairausvastuksen ja tiheyden välillä. Pearsonin korrelaatiokertoimen neliön arvoksi pilarilla B14/152 on saatu 0,5708, josta korrelaatiokertoimeksi saadaan 0,756. Samalla tavalla maareissä mitatuilla kairausvastuksen ja tiheyden arvoilla on hyvä lineaarinen korrelaatio, kuva 30. Pearsonin korrelaatiokertoimen neliö maareikämittauksessa on 0,66, josta edelleen korrelaatiokerroin on 0,812.

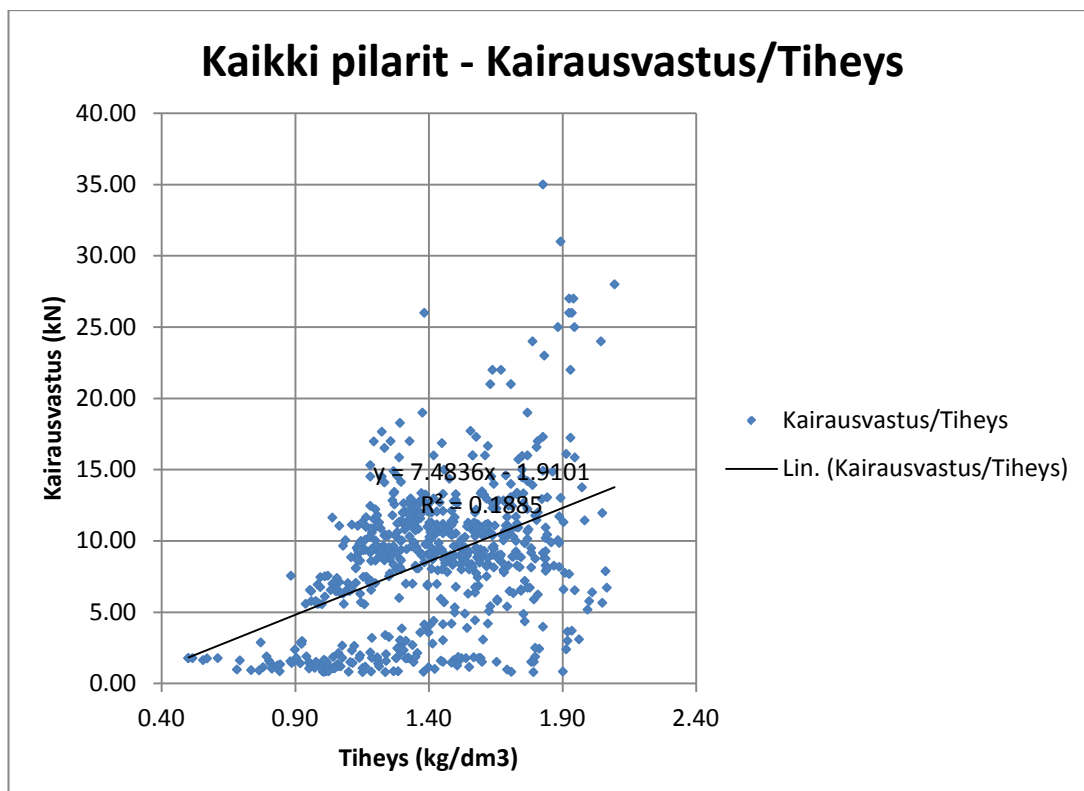
Kairausvastuksen ja tiheyden välisestä riippuvuudesta ei voi kuitenkaan tehdä luotettavia päätelmiä, sillä aiemmin esitetty tulos on vain yhdestä reikämittauksesta. Kun otetaan huomioon koko aineisto, kairausvastuksen ja tiheyden lineaarinen korrelaatio ei ole kovin hyvä. Eksponentiaalista, logaritmista ja polynomista sovitusta kokeilemalla ei saavutettu merkittävästi parempaa korrelaatiota kuin lineaarisella sovituksella. Kaikkien koestettujen pilareiden kairausvastuksen ja tiheyden keskinäinen lineaarinen riippuvuus on esitetty kuvassa 31. Koko aineistosta Pearsonin korrelaatiokertoimen neliö on 0,1885, josta edelleen korrelaatiokerroin on 0,434. Koko aineistossa kairausvastuksen ja tiheyden välinen korrelaatio on huono. Koko aineisto näyttäisi olevan kaksijakoinen, kuva 31. Kaksijakoisuuden vuoksi kokeiltiin aineiston jakamista metrin syvyysväleihin, jotta nähdään toimiiko korrelaatio jossain maakerroksessa paremmin kuin toisissa. Yksittäisillä väleillä korrelaatio ei kuitenkaan ollut merkittävästi parempi kuin 0,4. Tästä voidaan päätellä, että tiheysmittauksen perusteella ei voi arvioida riittävän selkeästi syvästabiloidun pilarin lujuutta, jotta sitä voisi käyttää yksinään syvästabiloinnin laadunvalvontaan. Pilarikairauksella voidaan erottaa tiheysmittausta helpommin ja selkeämmin pilarin lujuusvaihtelut.



Kuva 29. Kairausvastuksen ja tiheyden välinen lineaarinen riippuvuus pilarissa 152.



Kuva 30. Kairausvastuksen ja tiheyden välinen lineaarinen riippuvuus savessa ja kuiva-kuoressa.



Kuva 31. Kairausvastuksen ja tiheyden välinen lineaarinen riippuvuus Linnanpellon pilareissa.

Pilarikairaustulosten perusteella huomataan, että keskimääräinen leikkauslujuus on reikämitatuissa pilareissa noin 100 kPa, kuva 27. Keskimäärin Linnanpellon alueella leikkauslujuus pilarikairalla mitattuna on ollut noin 160 kPa, kuva 27. Ennakoivissa laskelmissa odotettiin että pilarin lujuus alenisi vain noin 2-3 %. Näiden tulosten perusteella reikämitattujen pilareiden lujuus on kuitenkin noin 38 % alaisempi kuin muissa Linnanpellon alueen pilareissa. Suuri osa lujuuden alenemasta johtuu todennäköisesti mitaustavan muutoksesta. Suurempaa keskireikää ei ole millään tavalla huomioitu leikkauslujuuden laskukaavassa. Näissä mittauksissa on käytetty samaa kokeellista kantavuuskertoimen arvoa 10, kuin muissakin alueen pilarikairauksissa. Jos näitä mittauksia tehtäisiin enemmän, kantavuuskertoimen arvo voitaisiin pienentää esimerkiksi arvoon 8, jolloin saataisiin lähempänä oikeita olevia leikkauslujuuden arvoja. On mahdollista, että pilari on vaurioitunut poraamisen vuoksi myös reiän ulkopuoliselta osalta. Tämän lujuudenmenetyksen suuruutta ei näiden tulosten perusteella voi arvioida. Pilarikairaustuloksia verrattaessa maareiästä tehtyyn pilarikairaukseen, huomataan että kairausvastus on kasvanut huomattavasti pilaroinnin seurauksena. Tässä kohteessa syvästabiloiduissa pilareissa on mitattu parhaimmillaan noin 5 kertaa suurempi kairausvastus kuin luonnonmaassa, taulukko 8. Lisäksi alkujaan pehmeässä maalajissa kairausvastus näyttää kasvaneen enemmän kuin alun perin lujemmassa maalajissa.

Pilarikairauksen hinta on suunnilleen sama kuin samanmittaisen geofysikaalisia mittauksia varten porattavan reiän hinta. Pilarikairauksia tai porauksia tehtiin työvuoron aikana noin 4-5 kappaletta, molemmissa hinta määräytyi työvuoron hinnan mukaan. Koska reiän poraamisen lisäksi pitää tehdä myös varsinainen reikämittaus, geofysikaaliset reikämittaukset ovat aina hiukan kalliimpia, kuin pilarikairaukset. Tämän työn yhteydessä tehtäviä geofysikaalisia mittauksia ehdittiin tekemään noin 2-4 mittausta tunnissa, joten niiden tekeminen valmiisiin reikiin on suhteellisen nopeaa ja edullista.

## 10 Johtopäätökset

Akustinen kokoaaltomittaus vesitäytteisessä reiässä tehtynä tässä työssä esitetyllä tavalla, ei voida katsoa soveltuvan syvästabiloinnin laadunvalvontaan. Poranreikämittausten hyvä puoli pilarikairaukseen verrattuna näyttäisi näiden tulosten perusteella olevan hiukan parempi syvyysulottuvuus. Halkaisijaltaan suurella putkella saadaan suora reikä syvälle eikä putkiterä karkaa ulos pilarista. Syvyysulottuvuudesta ei kuitenkaan ole hyötyä, kun mittausmenetelmällä ei saada mitattua tavoiteltuja suureita Kirjallisuustutkimuksen perusteella geofysikaaliset menetelmät kuten sähköiset ja seismiset menetelmät eivät näyttäisi tarjoavan suuria parannuksia syvästabiloinnin laadunvalvontaan.

Tiheysmittauksesta voi olla apua stabiloidun materiaalin koostumuksen tutkimisessa, ei niinkään lujuuden ja homogeenisuuden tutkimisessa. Pilarikairaus on edelleen järkevin ja taloudellisin tapa suorittaa syvästabiloinnin laadunvalvontaa. Sillä saadaan kohtuullisin kustannuksin riittävän tarkkaa tietoa pilarin lujuudesta. Geofysikaaliset reikämittausmenetelmät ovat suhteellisen edullisia ja nopeita suorittaa. Niitä ei kuitenkaan kannata käyttää syvästabiloinnin laadunvalvontaan, jos ei osoiteta, että menetelmistä on jotain hyötyä.

Akustista luotainta on mahdollista kehittää paremmin syvästabiloinnin tutkimiseen soveltuvaksi. Luotaimella pitäisi ehkä saada aikaan parempi kontakti lähettimen ja pilarin välille, jotta aaltoenergia siirtyisi tehokkaammin. Paremman kontaktin luominen ei välttämättä ole vaikeaa, mutta se edellyttää myös mittaustekniikan kehittämistä. Parempi kontakti todennäköisesti vaikeuttaa ja hidastaa mittauksia. Toinen mahdollisuus olisi keilla luotainta, jossa on enemmän kuin kaksi vastaanotinta. Useammalla vastaanottimella havaitaan ehkä aaltoja joita kahdella vastaanottimella ei voi havaita.

## Lähdeluettelo

Aalto, A. 1998. Syvästabilointi. Tuotantotekniikka, laadunvalvonta, mitoitus. Teknillisen korkeakoulun pohjarakentamisen ja maamekaniikan laboratorio. TEKES yms. 164 s.

ALT. Akustisen mittalaitteen tekniset tiedot. [http://www.alt.lu/full\\_wave\\_FS.htm](http://www.alt.lu/full_wave_FS.htm). [Luettu 18.10.2011].

Axelsson, M. 2001. Djupstabilisering med kalkcementpelare – metoder för produktionsmässig kvalitetskontroll i fält. Swedish Djupstabilisering. Swedish Deep Stabilization Research Centre. Rapport 8. Linköping. ISSN 1400-1292. 157 s.

Cosma et al. 1984. The Crosshole Seismic Method. Report 10.8.1984. Geotek Oy, Helsinki. 38 s.

Dammert, V. Väättä, A. 1986. Heikkousvyöhykkeiden geofysikaaliset tutkimusmenetelmät. Tutkimusseloste A75. Vuorimiesyhdistys. Outokumpu. 100 s.

Ellis, D.V. 1987. Well logging for earth scientists. Elsevier, New York, USA. 532 s.

Geological Survey of Canada. Viimeksi päivitetty 30.10.2007. Full Waveform Acoustic, Geological Interpretation of Full Waveform Acoustic Logs. [http://gsc.nrcan.gc.ca/borehole/acoustic\\_e.php](http://gsc.nrcan.gc.ca/borehole/acoustic_e.php). [Luettu 18.8.2011].

Geomachine Oy. Kairausvaunun tekniset tiedot. [http://www.geomachine.fi/sites/default/files/GM200GLjaGT\\_fi\\_0.pdf](http://www.geomachine.fi/sites/default/files/GM200GLjaGT_fi_0.pdf). [Luettu 11.10.2011].

Haataja, J. 2011. Keskustelut. Helsingin kaupunki. Kiinteistövirasto. Geotekninen osasto.

Helsingin kaupunki. Kartta- ja maaperätiedot Linnanpellon alueesta ja stabiloituvuuskoekokeiden tulokset.

Honkaniemi, M. Aho, S. 2007. Linnanpellon rakennettavuusselvitys. Suomen IP-Tekniikka Oy. Helsingin kaupunki, kaupunkisuunnitteluvirasto. 18 s.

Junnila, A. Lehtonen, J. 1996. Geotekninen kustannustiedosto, Geokuti 96. Helsinki 1996. ISBN 951-772-846-8. ISSN 0788-6209. 19 s.

Juvankoski, M. Valasti, P. Korkiala-Tanttu, L. 2007. Pohva 1: 3D-maaperämalli syvästabilointiin ja paalutukseen sekä pohjasuhdetiedon hallinnan riskit: loppuraportti. Tutkimusraportti VTT-R-10654-07. TEKES 40250/05, 1188/31/04. 119 s.

Keränen, Pertti. 2011. Keskustelut. Helsingin kaupunki. Kiinteistövirasto. Geotekninen osasto.

Lahtinen, P. Parkkinen, E. 1992. Syvästabiloinnin laadunvalvontaohje. Tielaitoksen selvityksiä 46/1992. 53 s.

Larsson, S. 2000. Mixing Processes for Ground Improvement by Deep Mixing. Report 6, English Translation July 2002, Swedish Deep Stabilisation Research Centre, Linköping.

Liikennevirasto. 2010. Syvästabiloinnin suunnittelu. Tien pohjarakenteiden suunnitteluohjeet. Liikenneviraston ohjeita 11/2010. 76 s. ISSN 1798-6648. ISBN 978-952-255-031-6

Massarsch, K. R. 2005. Deformation Properties of Stabilized Soil Columns, Proceedings, Intern. Conf. On Deep Mixing, Stockholm, 23 – 25 May, 2005. 16 s.

Melander, K. 1989. Puristin- heijarikairaus kairausmenetelmänä. Helsingin kaupungin kiinteistövirasto. Geoteknisen osaston tiedote 48. 99 + 6 s.

Okko, O. 1992. Matalaseismiset menetelmät rakennusgeofysiikassa. Geotekniikan laboratorio. Espoo. VTT Julkaisuja – Publikationer 655. 120 s. ISBN 951-38-3537-5. ISSN 0358-5077.

Okko, O. Hassinen, P. 1992. Akustinen luotaus kallion rakennetutkimuksissa. Tie-, geo- ja liikennetekniikan laboratorio. Espoo. VTT Julkaisuja – Publikationer 762. 69 s. ISBN 951-38-4110-3. ISSN 1235-0613.

Parkkinen, E. 1991. Syvästabiloinnin laadunvalvonta. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Rakennustekniikan osasto. 77 s.

Peltoniemi, M. 1988. Maa- ja kallioperän geofysikaaliset tutkimusmenetelmät. Otakustantamo. 411 s. ISBN 951-672-056-0.

Rantala, Kalle. 2011. Keskustelut. Helsingin kaupunki. Kiinteistövirasto. Geotekninen osasto.

Ramboll Oy. Pilarikairaustulokset Linnanpellon alueelta.

Richart et al. 1970. Vibrations of Soils and Foundations. Prentice Hall. USA. 414 s. ISBN 0139417168.

Saksa, P. 1985. Borehole geophysical investigations of Lavia deep test hole. Finland. Report YJT-85-06. Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies. Helsinki. 82 s.

Salminen, P. 1986. Teollisuusmineraaliesiintymien raakku- ja malmityyppikartoitus geofysikaalisten menetelmien avulla. Tutkimusseloste No A 76, Vuorimiesyhdistys, Outokumpu. 59 s.

SFS-EN 14679 + AC. 2005. Pohjarakennustyöt. Syvästabilointi. Standardi. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 48 s.

SFS-KÄSIKIRJA 173-2. 2005. Pohjarakentamistöiden suorittaminen. Osa 2: Syvästabilointi, lujitettu täyttö, injektointi, suihkuinjektointi, pystyöjitus ja syvätyritys. Standardi. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 265 s.

SGF. 2000. Kalk- och kalkcementpelare – Vägledning för projektering, utförande och kontroll. Rapport 2:2000. Svenska Geotekniska Föreningen, Linköping. 111 s.

SGY. 1993. Geofysikaaliset tutkimusmenetelmät. Rakennustieto Oy. 65 s. ISBN 951-682-281-9.

SVT. 2011. Suomen virallinen tilasto. Rakennuskustannusindeksi [verkkajulkaisu]. ISSN 1795-4282. Helsinki. Tilastokeskus. [viitattu 24.8.2011]. Sijainti: <http://www.stat.fi/til/rki/index.html>.

Syvästabilointiohje STO-91. 1992. Rakennusaineteollisuusyhdistys ry ja Rakennustieto Oy. Helsinki. 52 s.

Tarvainen, A-M. 2011. Akustiset luotaukset ja tiheysmittaukset Helsingin Linnanpellossa touko-kesäkuussa 2011. Helsingin kaupunki kiinteistövirasto/geotekninen osasto. Suomen Malmi Oy. 4 s.

Tiehallinto. (2002). Pohjarakentamisen kustannustietoja. Tiehallinnon sisäisiä julkaisuja 19/2002. Helsinki. 12 s. TIEH 4000330. ISSN 1457-991X.

Winqvist, F. (2011). Keskustelut Ramboll Oy:n tutkimuspäällikön kanssa touko-kesäkuussa 2011.

Åhnberg et. al. 1995. Cement och kalk för djupstabilisering av jord. En kemisk-fysikalisk studie av stabiliseringseffekter. Linköping, Swedish Geotechnical Institute, Rapport no 48. 213 s. ISSN 0348-0755.



## Liiteluettelo

- Liite 1. Kairausvaunun tekniset tiedot. 1 sivu.
- Liite 2. Koekentän pilareiden sijainnit. 1 sivu.
- Liite 3. Mittausraportti geofysikaalisilla menetelmillä. 4 sivua.
- Liite 4. Yhdistetyt geofysikaaliset mittaukset ja kairaukset 5 sivua.
- Liite 5. Tyypillinen kairausdiagrammi Linnanpellon alueelta. 1 sivu.
- Liite 6. Stabiilituvuuskokeiden tuloksia. 1 sivu.
- Liite 7. Akustisen mittalaitteen tekniset tiedot. 1 sivu.
- Liite 8. Tyypillinen pilarikairaustulos Linnanpellon alueelta. 1 sivu.
- Liite 9. Geofysikaalisten mittausten tulokset. 7 sivua.
- Liite 10. Pilarikairausten tulokset. 9 sivua.

*Kairausvaunun tekniset tiedot**([http://www.geomachine.fi/sites/default/files/GM200GLjaGT\\_fi\\_0.pdf](http://www.geomachine.fi/sites/default/files/GM200GLjaGT_fi_0.pdf)).***GM 200 GT/GL****Teknillinen erittely:****Yleistä:**

Paino: 7000-9000 kg ilman kairauskalustoa ,varusteista riippuen  
 Pituus: 5500 mm puskulevyn kanssa  
 Leveys: 2200 - 2400mm, varusteista riippuen  
 Korkeus: 2500 mm (puomi kuljetusasennossa)  
 Maavara: 480 mm vakiona

**Alusta:**

Ajo: taakse sijoitetut 2-nopeuksiset, jarrulliset hydraulimoottorit (2 kpl)  
 Ajonopeus: max, 6 kmlh  
 Telan leveys: 400 mm  
 Telan pituus: 2100-3500 mm  
 8 pyörää, ohjaavat taittopyörät edessä, vetopyörät takana, neljät telit  
 Hydraulisesti kiristettävät kangasvahvisteiset telat  
 Dieselmoottori: 129 kW, nestejäähdytys

**Syöttölaite:**

Syöttöpituus [mm]: 3500 ( syöttöpituus vakio, sylinteri- tai sylinterilketjussyötöllä)  
 Puristusvoima [kN]: 40 (maks. 80)  
 Nostovoima [kN]: 70 (maks. 150)  
 Puomin liikkuminen pystysuunnassa: 1500 mm  
 Sivukallistus:  $\pm 12^\circ$ ,  $12^\circ$  taakse sekä  $80^\circ$  eteen

<b>Pyöritysyksikkö:</b>	<b>GT (poraus)</b>	<b>GL (tim.kairaus)</b>	<b>GT (poraus)</b>
Vääntömom. Maks[Nm]:	6000/3000	500	6000/3000
Pyöritysnop. [RPM]:	60/120	2000	60/120
Vasara:	Furukawa F3 isku energia 345 J		
Sovitteet:	Poraniska / ilma+vesilieka, useita eri kierretyyppejä		

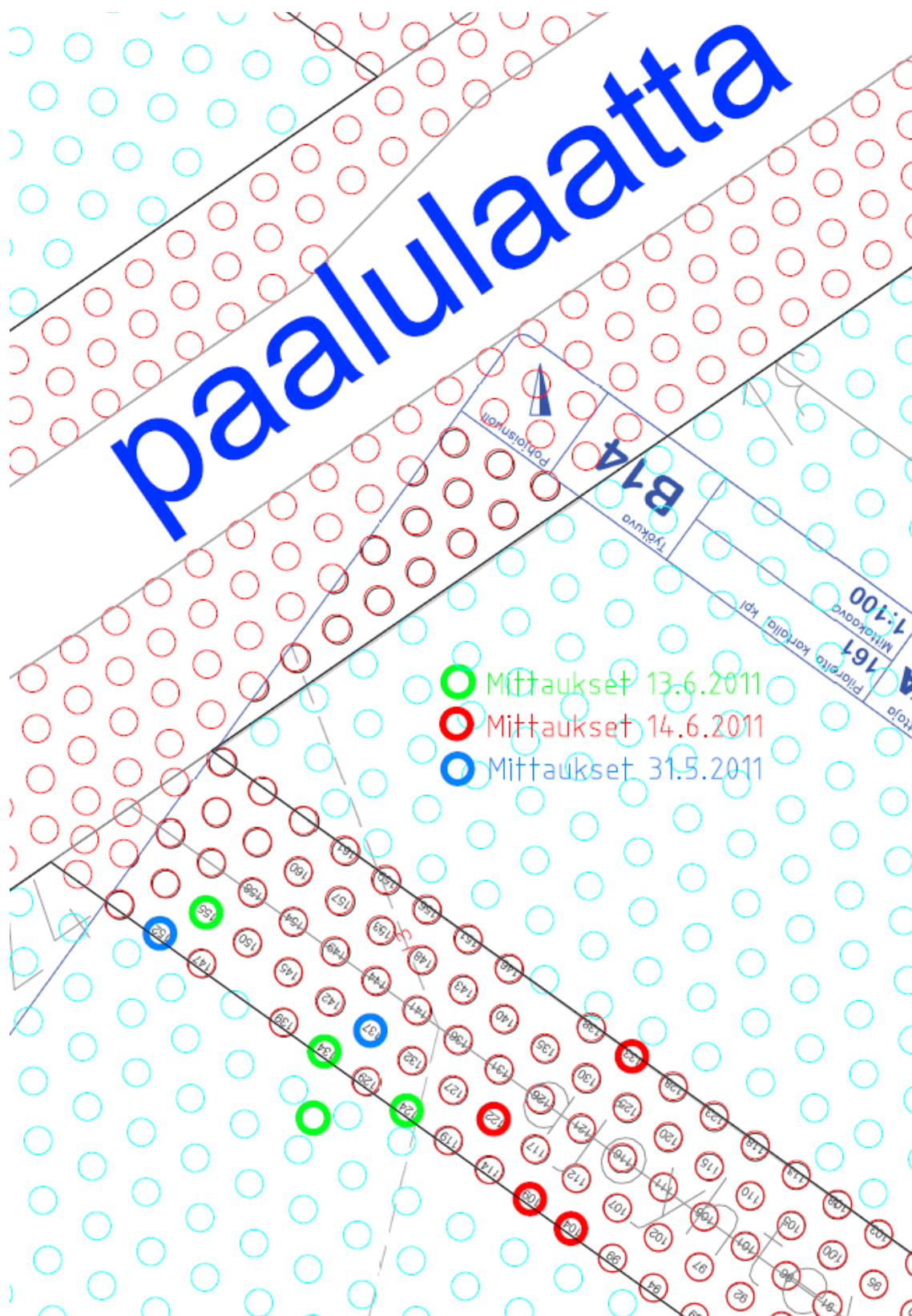
GL-malli on geologisiin tutkimuksiin, pyöritysyksikköjen sivusiirto hydraulisesti

**Lisävarusteet:**

Radiokauko-ohjaus  
 Lukittava työkalulaatikko  
 Työ- ajo- ja varoitusvalot  
 Poraparametrien rekisteröintianturit  
 Webasto tai Termi moottorilämmitin  
 Elektroninen työkonevilkku  
 RUFCO-tallenninjärjestelmä (vaihtoehto Envi)  
 Ruuvi/putkipenkki  
 Pölynsiirtäjä, ejektorimallinen  
 Hydraulikäyttöiset:

- tankolukko
- korkeapainevesipumppu 80 l/min, 5 - 50 bar
- vinssi edessä, vetovoima 80 kN
- puskulevy tai tukijalat
- tankoteline
- hiomakone
- avaajapöytä, malli kevyt tai pyörittävä
- paineilmakompressori 4 m<sup>3</sup> / 7 bar

Koekentän pilareiden sijainnit (Skanska).



Mittausraportti geofysikaalisilla menetelmillä (Tarvainen 2011).



Anna-Maria Tarvainen  
Akustiset luotaukset ja tiheysmittaukset  
Helsingin Linnanpellossa touko-kesäkuussa  
2011

Kesäkuu 2011

## AKUSTISET LUOTAUKSET JA TIHEYSMITTAUKSET HELSINGIN LINNANPELOSSA TOUKO-KESÄKUUSSA 2011

### 1 JOHDANTO

Suomen Malmi Oy suoritti akustisia mittauksia touko- ja kesäkuussa 2011 Helsingin Linnanpellon syvästabilointityömaalla Helsingin kaupungin tilauksesta. Samoissa rei'issä suoritettiin myös tiheysmittaukset. Tarkoituksena oli tutkia syvästabilointipilareiden lujuutta. Mittauksia suoritettiin kahdeksassa halkaisijaltaan 75-77 mm reiässä, jotka olivat porattu syvästabilointipilariin ja yhdessä reiässä, joka oli porattu suoraan savimaahan. Mitatut reiät on ilmoitettu taulukossa 1. Testimittaukset suoritettiin 30.5. testimittaukset ja varsinaiset mittaukset 13. ja 14.6.. Kenttätyöstä vastasi työnjohtaja Antero Saukko. Tulokäsittelyn ja raportoinnin suoritti geofysikko Anna-Maria Tarvainen.

**Taulukko 1:** Mitatut reiät ja mittaussyvyudet.

Reikä	Mittauspäivä	Mittaussyvyys (m), akustinen	Mittaussyvyys (m), tiheys
B14-104	14.6.	3.85	3.63
B14-109	14.6.	5.97	5.97
B14-122	14.6.	4.49	4.07
B14-124	13.6.	5.69	5.05
B14-133	14.6.	2.68	2.92
B14-134	13.6.	3.95	3.75
B14-137	31.5.	7.74	7.52
B14-152	31.5.	7.58	7.46
B14-155	13.6.	5.84	5.96
maareikä	13.6.	4.84	4.84

*Mittausraportti geofysikaalisilla menetelmillä (Tarvainen 2011).***2 MITTAUSTEN PERIAATTEET JA MITTALAITTEET****2.1 Akustisen luotaus**

Akustisessa reikämittauksessa lähetetään korkeataajuisia (10–100 kHz) akustista aaltoa reiässä olevaan veteen. Rajapinnan kohdatessaan aallot heijastuvat pitkittäisinä ja poikittaisina runkoaaltoina (P- ja S-aallot) sekä pinta-aaltoina. Heijastuneet aallot rekisteröidään yhdellä tai useammalla vastaanottimella. Akustisten aaltojen etenemisnopeus riippuu väliaineen kimmo-ominaisuuksista. Luotauksilla voidaan havainnoida mm. väliaineen heikkousvyöhykkeitä. Luotausparametreja ovat mm. P-, S- ja runkoaaltojen nopeudet sekä erilaiset kimmokertoimet. Poissonin luku saadaan määritettyä suoraan P- ja S-aaltojen nopeuksista, mutta muiden kimmokertoimien määrittämiseksi tarvitaan myös väliaineen tiheys.

Mittauslaitteistona käytettiin Advanced Logic Technology:n (ALT) FWS50-luotainta ja ALT:n tiedonkeruuyksikköä. Pietsokeraaminen lähetin toimii 15 kHz:n ominaistaajuudella ja luotaimessa on kaksi vastaanotinta, RX1 ja RX2, saapuvien aaltojen havainnoimiseksi. Vastaanottimet sijaitsevat 0,6 metrin (RX1) ja 1,0 metrin (RX2) etäisyydellä lähettimestä. Laitteiston halkaisija on 50 mm. Saapuvat aallot näytteistetään digitaalisesti annettujen mittausparametrien mukaisesti ja tallennetaan raakatiedostoon. Mittaussyvyys määritetään matkapyörän pulssianturin avulla. Lisäksi kaapelissa on merkit 10 m välein, ja niiden sekä elektronisen syvyysmittauksen avulla voidaan tarvittaessa korjata mahdolliset kaapelin venymisen tai luistamisen aiheuttamat virheet. Laitteiston tekniset tiedot löytyvät liitteestä 2.

**2.2 Tiheysmittaus**

Tiheysmittaus perustuu gammasäteilyn takaisinsirontaan (gamma-gamma-menetelmä). Takaisinsironneesta säteilyn suuruuden avulla voidaan arvioida mm. väliaineen tiheyttä ja huokoisuutta. Tiheysmittaus suoritettiin Geovistan Slimhole Density -laitteistolla. Laitteen halkaisija on 38 mm. Laitteistossa on 10 mCi:n cesiumlähde. Laitteisto rekisteröi gamma-gammasäteilyn suuruuden kahdella vastaanottimella, jotka sijaitsevat 11 cm:n (SSD) ja 22 cm:n (LSD) päässä säteilylähteestä. Säteily rekisteröidään pulsseina (cps, counts per second) ja muutetaan kalibrointikertoimen avulla tiheydeksi. Kalibrointi riippuu mm. kairareian halkaisijasta ja siitä millaisessa väliaineessa (vesi, ilma jne.) mittaukset suoritetaan.

*Mittausraportti geofysikaalisilla menetelmillä (Tarvainen 2011).***3 TULOSKÄSITTELY JA TULOKSET**

Akustisen luotausten tulokäsittelyssä käytettiin WellCAD- ja ReflexW-ohjelmia. Raakatiedostot avattiin WellCAD-ohjelmalla ja tallennettiin SEG 2-formaattiin ReflexW-ohjelmaa varten 2 cm:n pistevälillä. Kustakin vastaanotetusta akustisesta aallosta poimittiin P-aaltojen saapumisaika Phase Follower -työkalulla, joka seuraa automaattisesti haluttua aallon vaihetta. Mikäli automaattinen poiminta ei onnistunut, poimittiin aallot manuaalisesti. Poimituista saapumisajoista laskettiin aallon nopeus. Vastaanottimella RX-1 (lähempänä lähetintä) vastaanotetut aaltojen amplitudit ovat heikompia ja lasketut nopeudet hitaampia. Vastaanottimen RX-2 tulokset ovat selkeämmin havaittavissa. Reiässä B14-137 kuvaajissa ei havaita akustisen aallon saapumista kummallekaan vastaanottimelle.

Tarkoitus oli poimia myös S-aaltojen saapumisajat, mutta näitä ei havaittu aineistosta lainkaan. Tämän vuoksi ei myöskään voitu laskea pilareille esimerkiksi Poissonin lukua tai muita kimmokertoimia. S-aaltojen puuttumiseen voi olla syynä esimerkiksi se, että aalto on kulkenut vain vedessä, reiän seinämää pitkin, jolloin heijastumista ei tapahdu eikä näin ollen myöskään S-aaltoja synny. Vaihtoehtoisesti heijastuneet S-aallot voivat olla amplitudiltaan niin heikkoja, ettei niitä pystytä havaitsemaan. Mittausolosuhteet rei'issä olivat heikohkot. Vesi oli liejuista, jolloin rajapinta ei välttämättä ole riittävän selkeä havaittavaksi tällä menetelmällä. Laitteisto on tarkoitettu lähinnä kallioperän tutkimuksiin, joissa veden ja kallion rajapinta on selkeämpi. Visuaalisessa tarkastelussakaan ei havaita selkeitä muutoksia aallon amplitudin vaimenemisessa tai aaltojen saapumisajan kasvamisesta vastaanottimille, mikä voisi kertoa heikkousvyöhykkeistä pilareissa. Ongelmallista oli myös se, että reiät paikoin tukkeutuivat, jolloin mitatut syvyydet jäivät lyhemmiksi kuin suunnitellut syvyydet.

Tiheysmittaukset onnistuivat teknisesti paremmin. Tiedossa oleva kalibrointi on tarkoitettu vesitäytteiselle 76 mm reiälle, jolloin muissa olosuhteissa mitatessa tiheyden arvot eivät ole oikeat, mutta mittauksella saadaan selville tiheysvaihtelut väliaineessa. Tiheys mitattiin kimmokertoimien laskemista varten, joten onnistuneetkaan mittaukset eivät yksinään vastaa alkuperäistä tutkimusasetelmaa. Tuloksissa on esitetty kummakin vastaanottimen (LSD, long spaced density ja SLD,

*Mittausraportti geofysikaalisilla menetelmillä (Tarvainen 2011).*

short spaced density) tulokset. Pilarien keskimääräinen tiheys on n. 1,5–1,8 kg/m<sup>3</sup> ja tiheysmittauksen arvot vastaavat keskiarvoa melko hyvin.

Tulokset on esitetty WellCAD-tiedostoissa. WellCAD-tiedostojen avaamiseen voi käyttää esimerkiksi WellCAD Reader -ohjelmaa.

**Liitteet**

Liite 1: WellCAD-kuvaajat

Liite 2: Laitteistojen tekniset tiedot

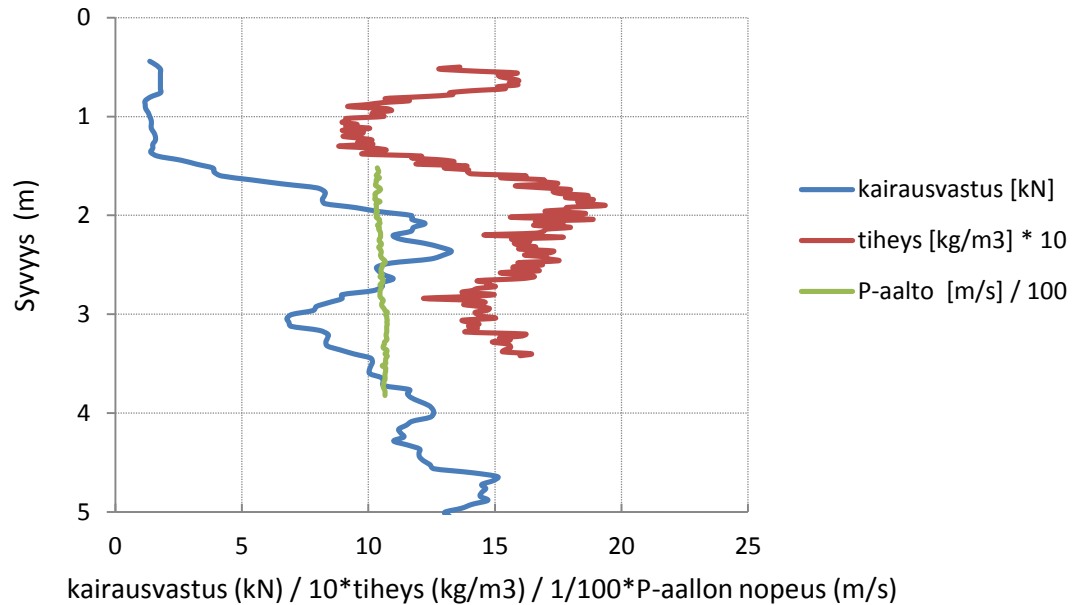
Espoossa 29.6.2010

Anna-Maria Tarvainen  
geofyysikko  
Suomen Malmi Oy

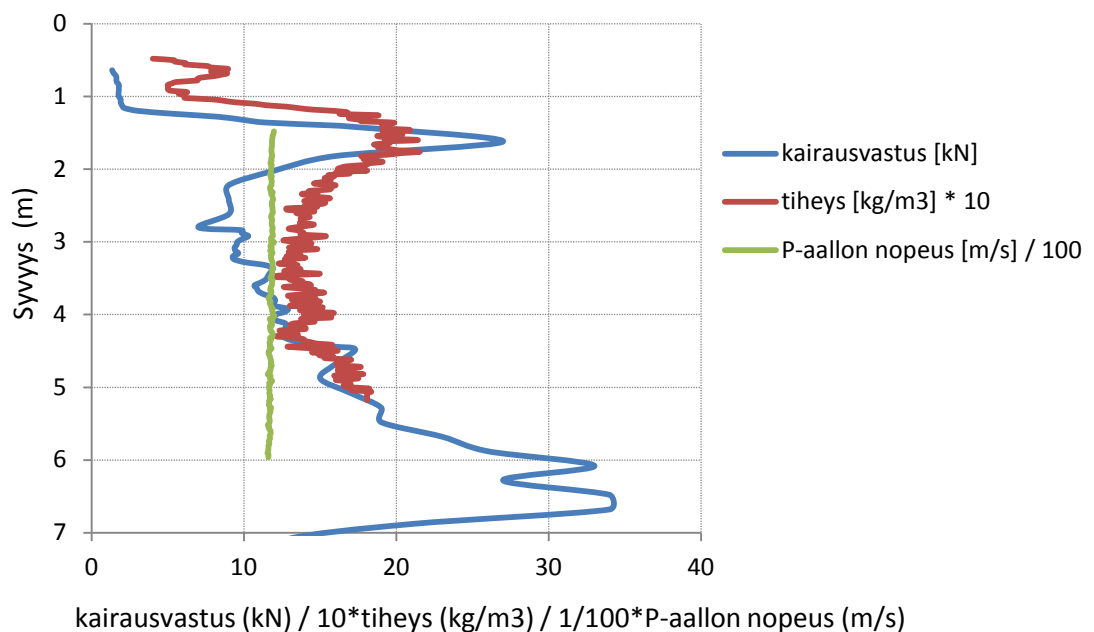


Yhdistelykuvaajia pilarituloksista: kairausvastus/tiheys/P-aallon nopeus

## B14/pilari104



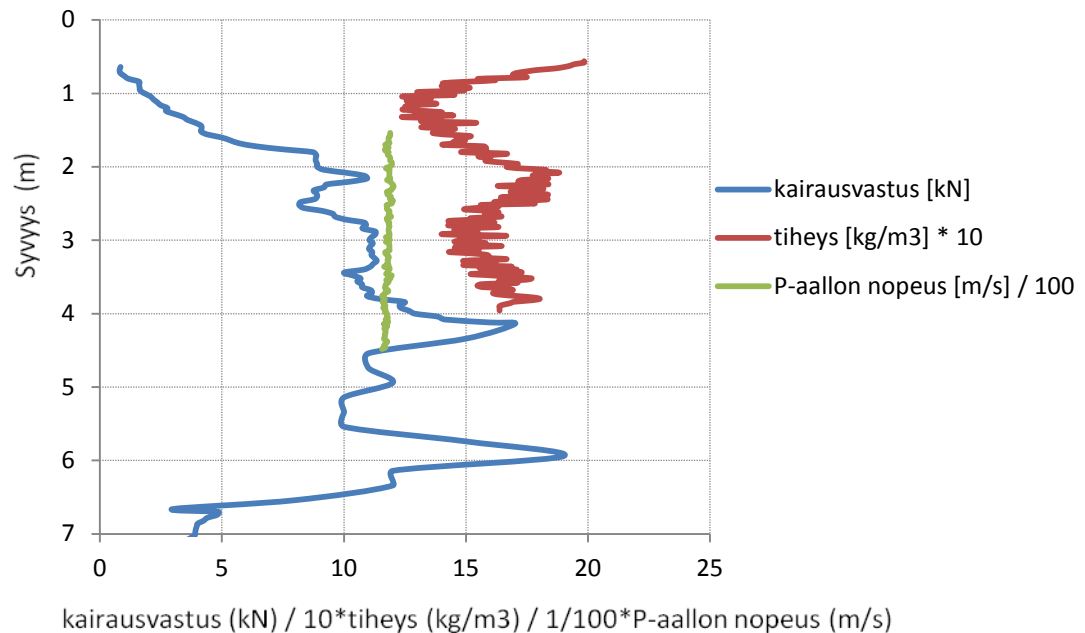
## B14/pilari109



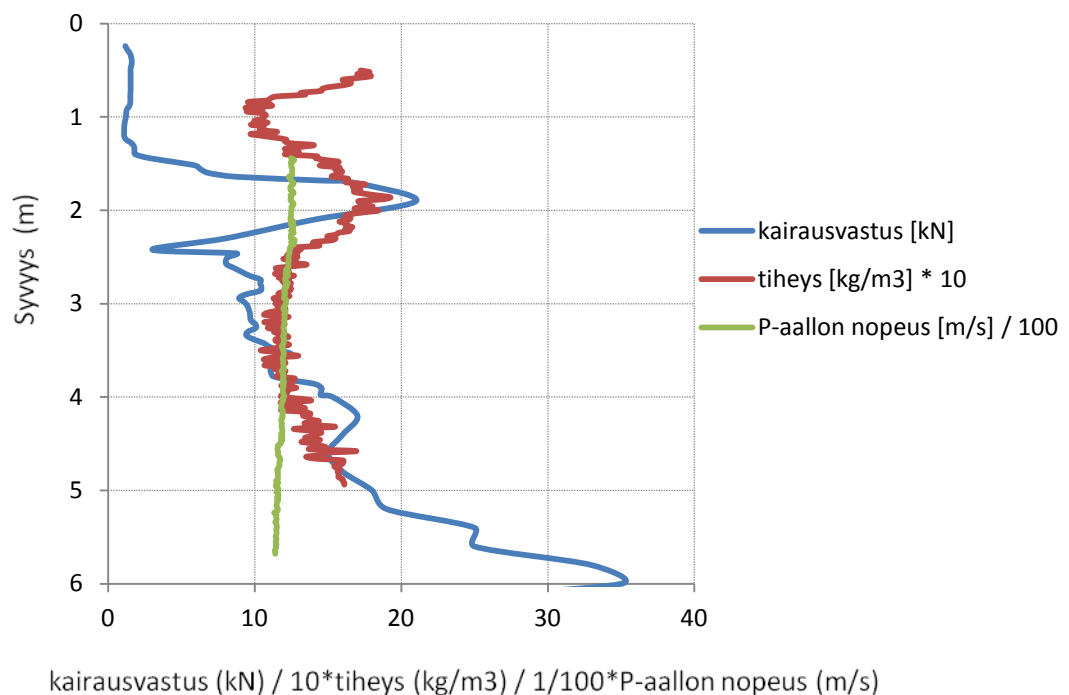


Yhdistelykuvaajia pilarituloksista: kairausvastus/tiheys/P-aallon nopeus

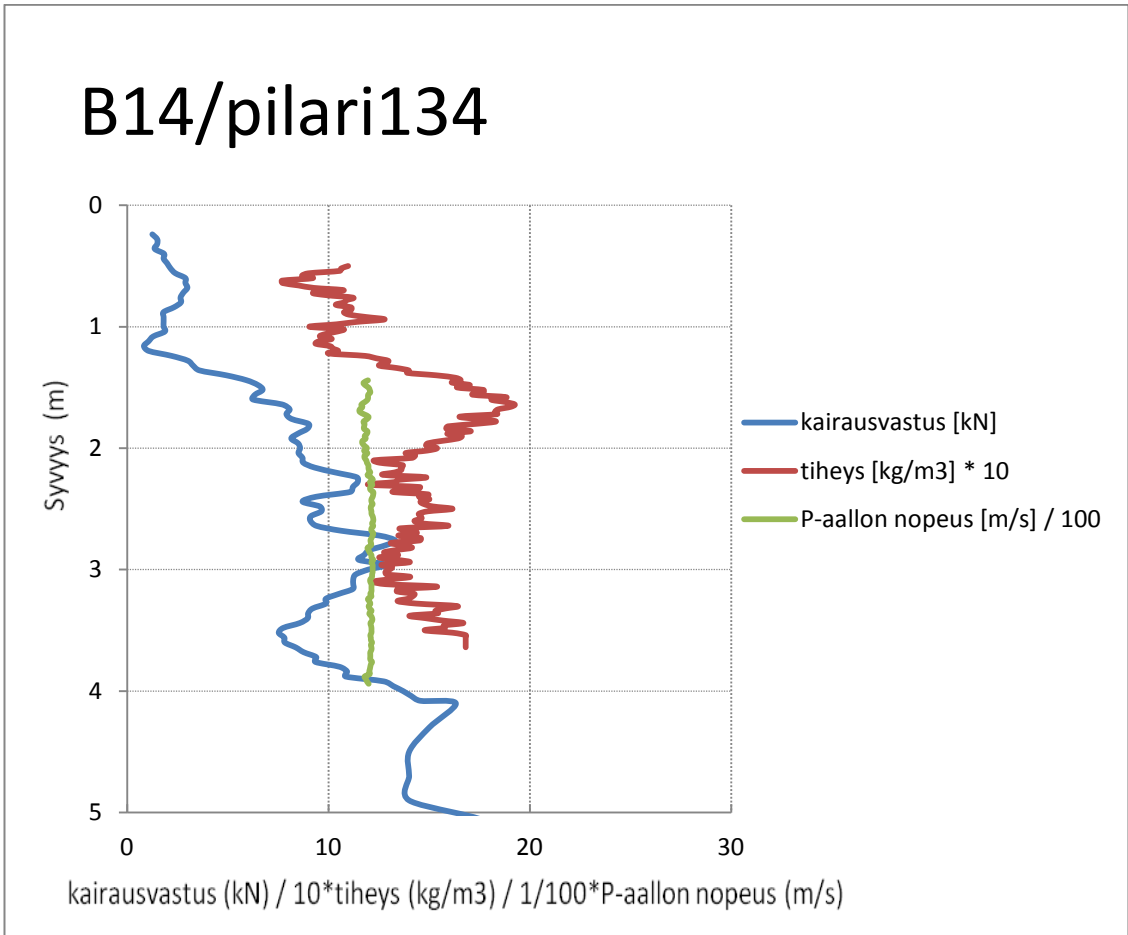
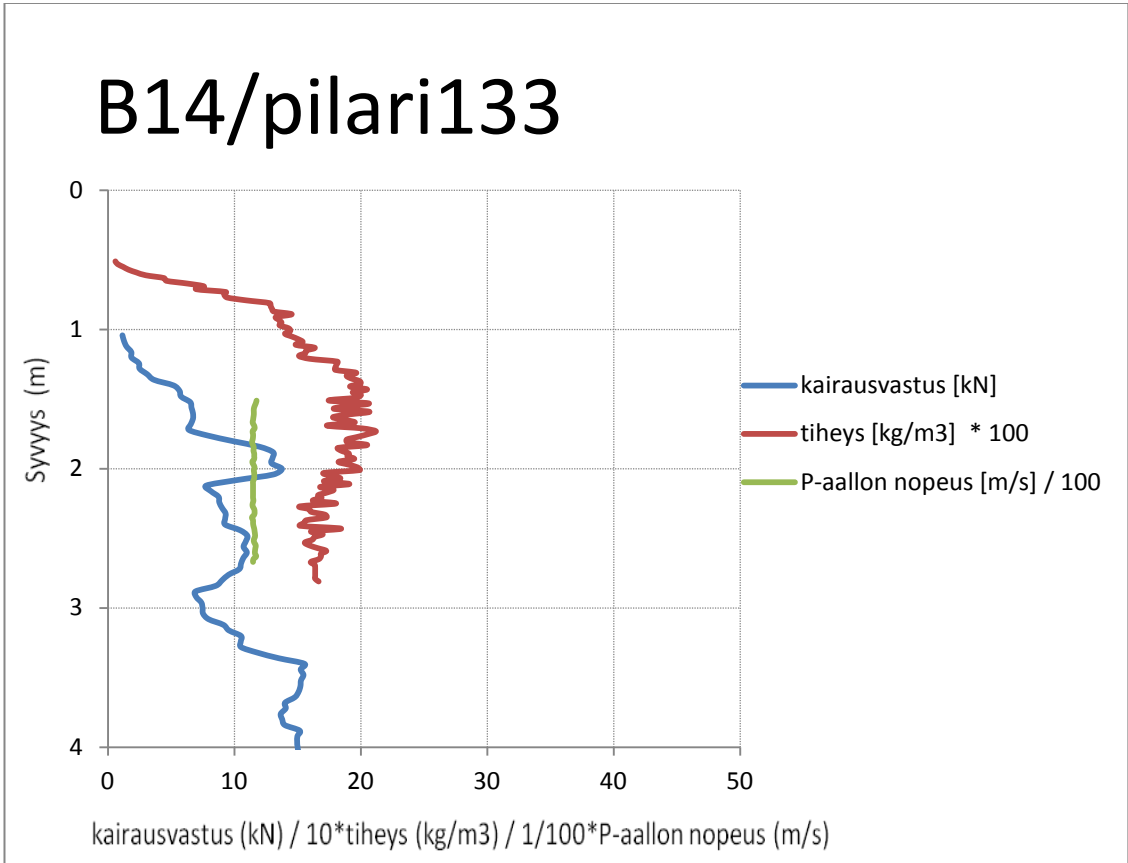
## B14/pilari122



## B14/pilari124

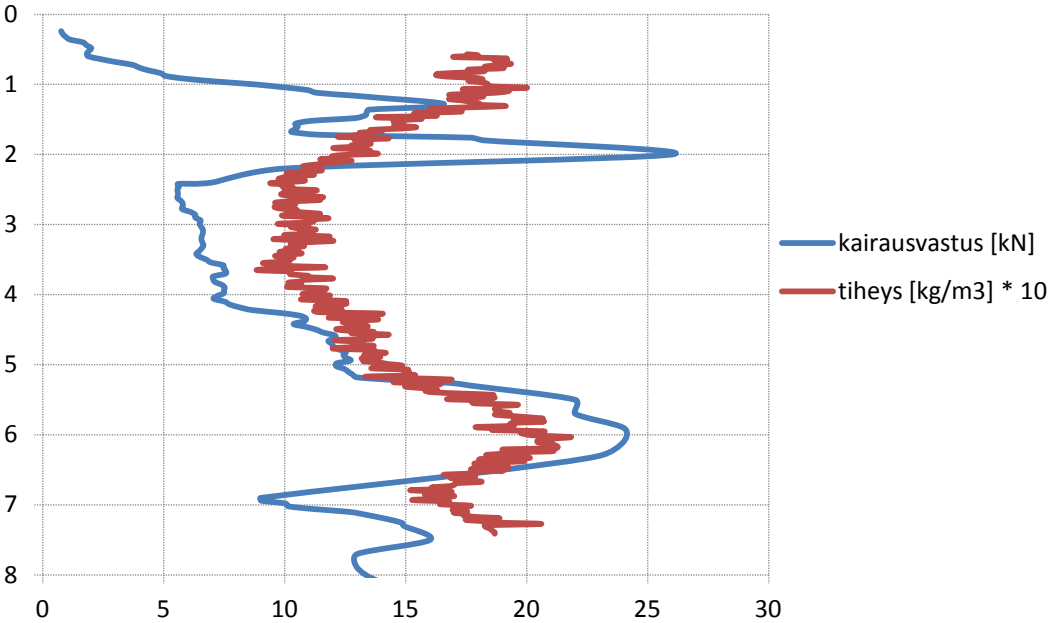


Yhdistelykuvaajia pilarituloksista: kairausvastus/tiheys/P-aallon nopeus

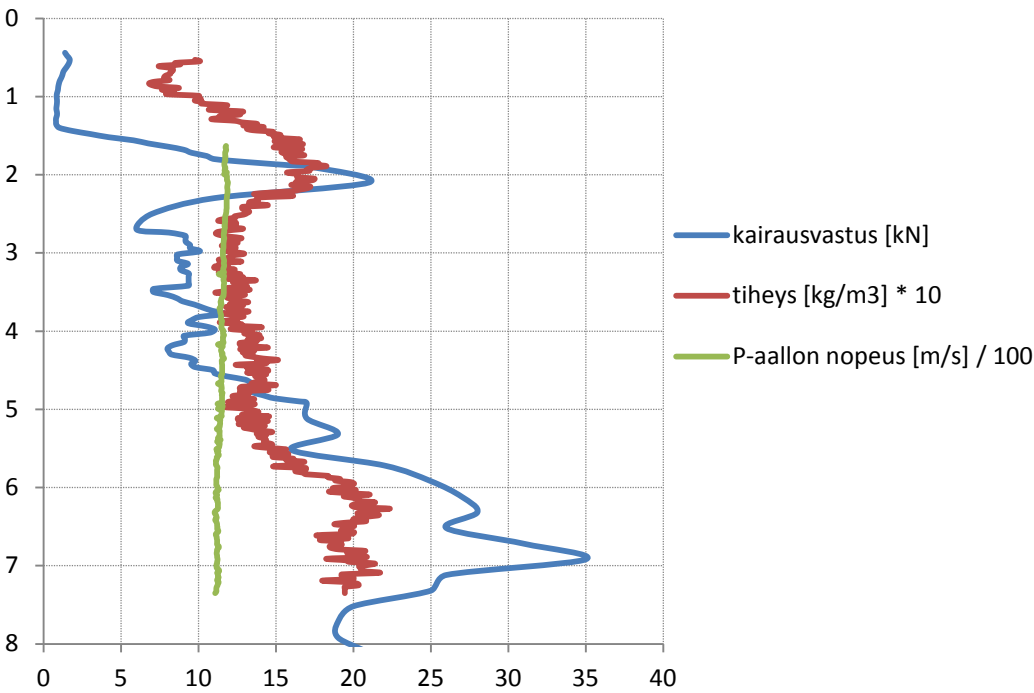


Yhdistelykuvaajia pilarituloksista: kairausvastus/tiheys/P-aallon nopeus

# B14/pilari137



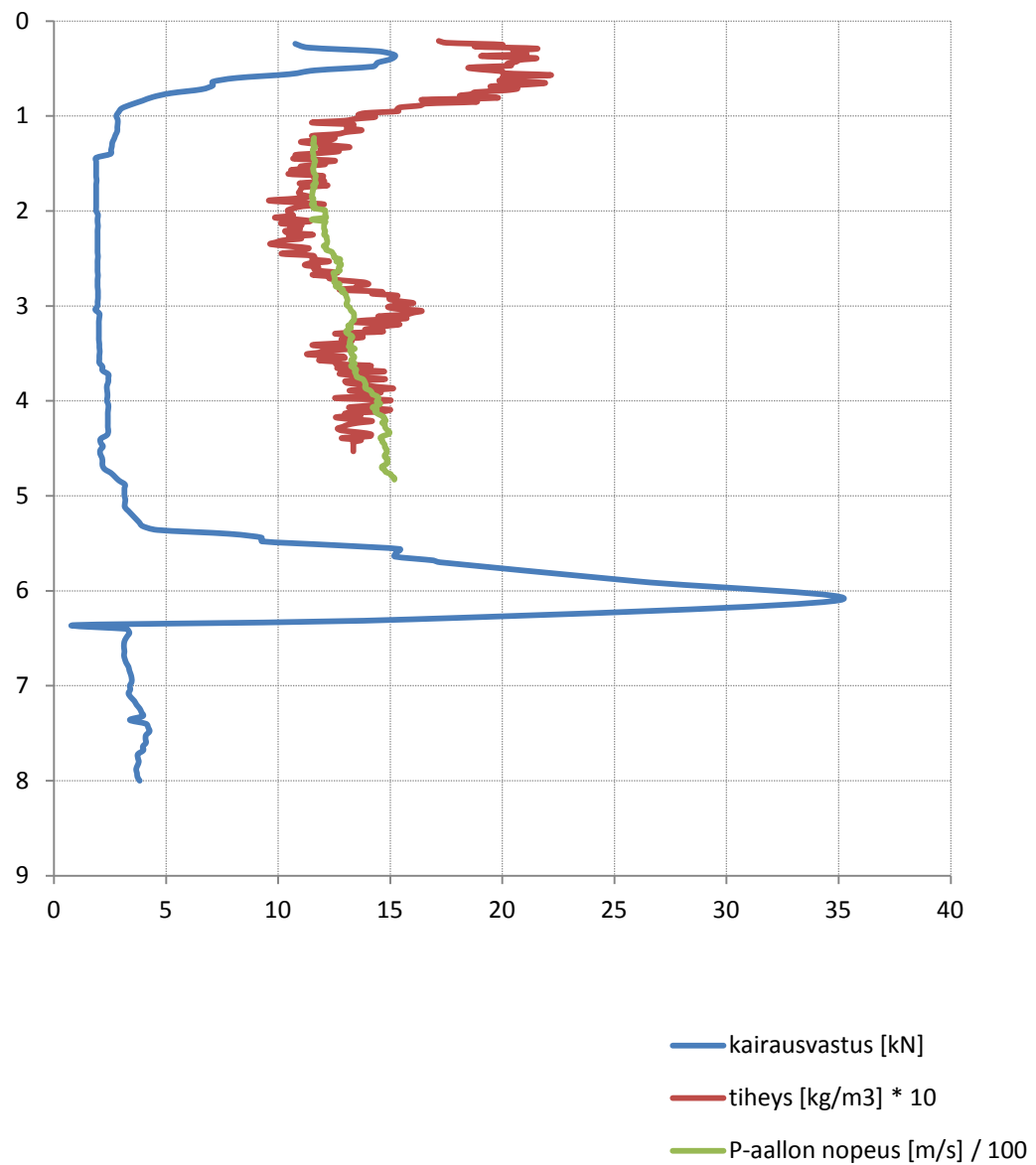
# B14/pilari152



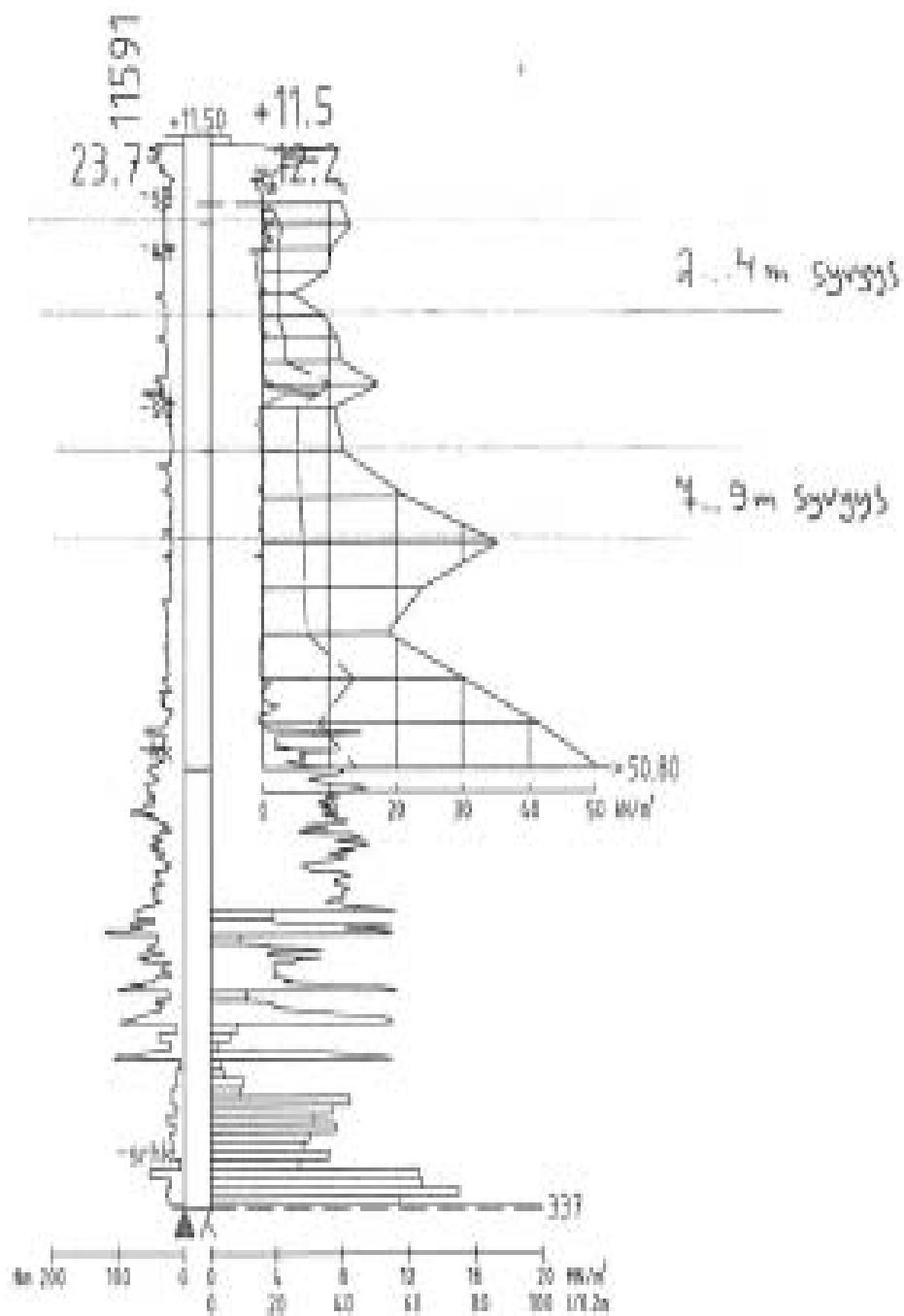
Yhdistelykuvaaja luonnonmaareistä: kairausvastus/tiheys/P-aallon nopeus

# Luonnonmaa


## Kairausvastus/Tiheys/P-aallon nopeus



Tyypillinen kairausdiagrammi Linnanpellon alueelta (Helsingin kaupunki).



*Maanäytteenotto stabiiloituvuuskokeiden yhteydessä (Helsingin kaupunki).*



Helsingin kaupunki  
**Rakentamispalvelu**

Piste No	1
Yk	58730.1
Xk	25342.7
Maanpinta	+11.50
Vedenpinta	

Tutk. No	11592 / 6600344
Tiedosto	d:\Geolab\Datat\11592.dat
Kohde	LINNANPELTO, KAAVA-ALUEEN ESIRAKENTAMINE
Päivämäärä	27.10.2009
Suun.	JHa

Sivu 1/1

Maanäytteiden tutkimusilmoitus

			Kartiokoe			Tilavuuspaino		Huokostilavuus			
Astian numero	Syvyys [m]	N. otin	H3/H1	Sk [kPa]	F [%]	t.p./w [kN/m <sup>3</sup> ]	t.p./d [kN/m <sup>3</sup> ]	e	Vesipitoisuus [%]	Maalaji	Huom.
85	2.33	St-60	-	4.32	-	14.5	6.8	2.88	112.8	ljSa	
64	3.13	St-60	-	4.32	-	15.8	7.9	2.36	100.5	ljSa	si kerroksia
68	3.93	St-60	23.86	6.47	47	16.3	9.6	1.75	68.7	Sa	
1	7.33	St-60	-	4.00	-	16.9	10.7	1.47	57.4	Sa	
86	8.13	St-60	36.64	10.40	35	15.9	11.2	1.36	41.5	Sa	si seassa
3	8.93	St-60	-	9.61	-	18.0	12.5	1.13	44.3	Sa	si seassa

Päiväys 27.10.2009

Tutki P Matikka

Tarkasti

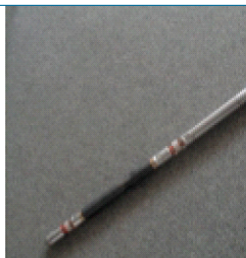
*Stabiloituvuuskokeen näytekappaleiden puristuskokeiden tulokset (Helsingin kaupunki).*

Putki No	Piste	Syvyys	Sävi g	Sideaine g	Tekopvm	kylmiöön	Stabaika	Pur.Pvm	putki	putki+nä	t.paino	lujuus
14	1	2.0-3.5m	600g	39g	30.10		14	13.11	472.9	992.2	15.6	522
3	1	2.0-3.5m	600g	39g	30.10		14	13.11	471.7	971.7	15.0	255
188	1	2.0-3.5m	600g	39g	29.10	12.11	28	25.11	484	995.8	15.3	376.5
16	1	2.0-3.5m	600g	39g	29.10	12.11	28	25.11	472.4	977.2	15.1	407
12	1	2.0-3.5m	600g	48g	30.10		14	13.11	472.3	964.6	14.8	369.5
143	1	2.0-3.5m	600g	48g	30.10		14	13.11	484.3	973.1	14.7	524.5
37	1	2.0-3.5m	600g	48g	29.10	12.11	28	25.11	478.4	972.4	14.8	386
16A	1	2.0-3.5m	600g	48g	29.10	12.11	28	25.11	472.6	977	15.1	518.5
4	1	2.0-3.5m	600g	58g	30.10		14	13.11	471.4	950.7	14.4	230
242	1	2.0-3.5m	600g	58g	30.10		14	13.11	471.7	952.1	14.4	180.5
8	1	2.0-3.5m	600g	58g	30.10	13.11	28	26.11	471.7	951.2	14.4	236
13	1	2.0-3.5m	600g	58g	30.10	13.11	28	26.11	481.7	971.3	14.7	178.5
217	1	2.0-3.5m	600g	68g	2.11		14	16.11	477.1	964.1	14.6	390
1	1	2.0-3.5m	600g	68g	2.11		14	16.11	485.6	982.7	14.9	395
13A	1	2.0-3.5m	600g	68g	2.11	16.11	28	30.11	471.9	963.4	14.7	446.5
198	1	2.0-3.5m	600g	68g	2.11	16.11	28	30.11	473.3	971.1	14.9	404

*Akustisen mittalaitteen tekniset tiedot (ALT).*

# FWS 50/68

## full wave form sonic



### Log parameters

- Full wave form per receiver.\*
- Formation velocity (slowness-porosity)\*
- Shear(S)velocity (we recommend more than 2 receivers in that application)
- Time of first arrival (delta-t)\*
- Amplitude of first arrival (CBL)\*

\*Real time process

### Applications

Sonic logs are widely used (in combination with certain other logs) to provide formation porosity and mechanical properties data. Under suitable acquisition conditions shear wave and slower (eg. Stoneleigh) arrivals can be detected. The tool will only function in fluid-filled hole and is normally run centralised. Logging speed depends to some extent on the tool configuration but is generally in the range 4 to 6 metres/minute

- Cased -hole

Location of poor or missing cement behind casing

- Open-hole

Lithology identification

Porosity

Rock strength and elasticity

(Poisson's ratio)

Fracture and permeability

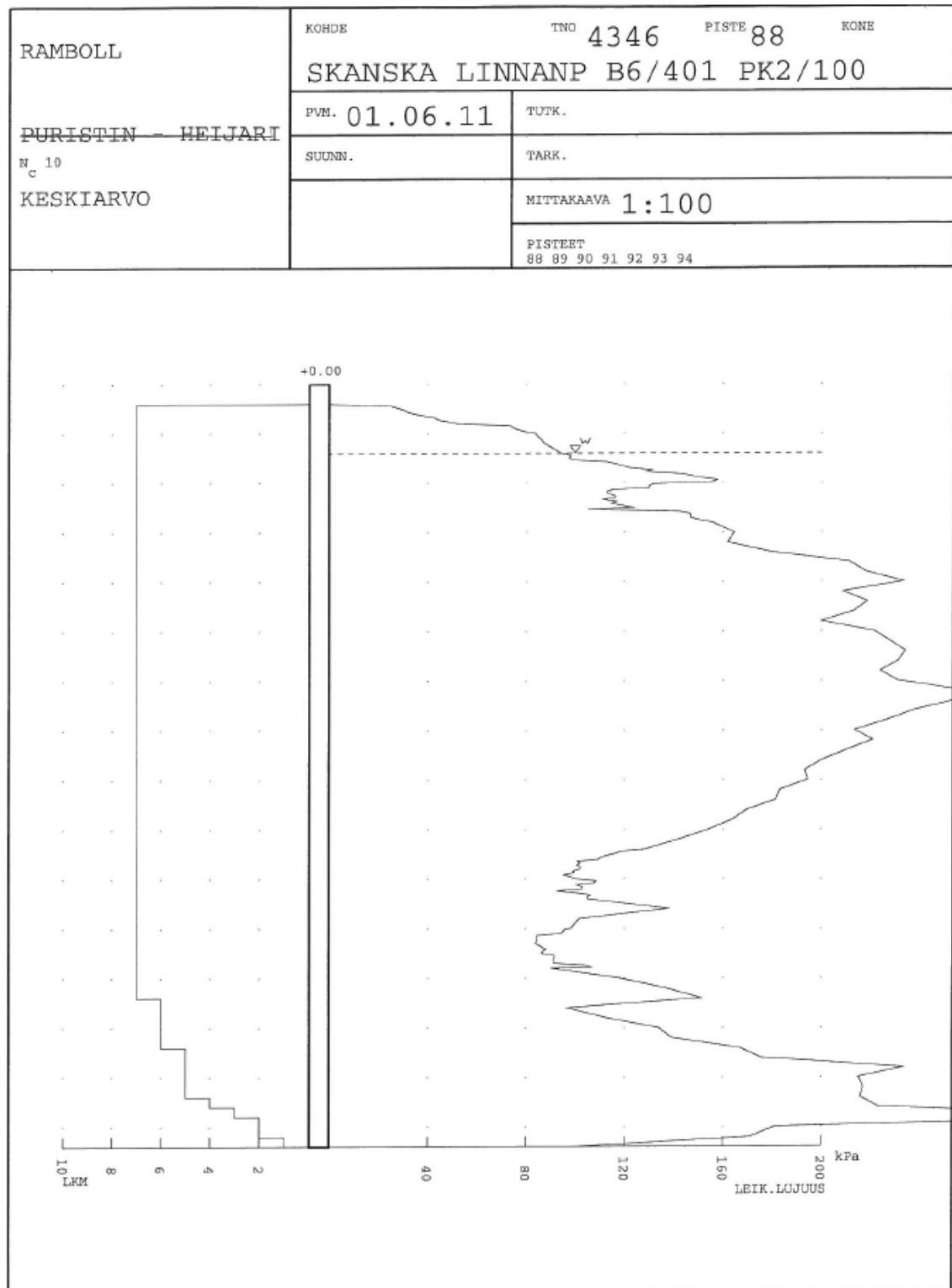
indication in hard rock

### Technical specifications

<b>Diameter:</b>	50mm / 68 mm
<b>Length:</b>	variable depending on configuration Typical : 2.6m variable –typical 18kgs
<b>Weight:</b>	70°C (158°F)
<b>Max temp:</b>	200 bar (3000 PSI)
<b>Max pressure:</b>	minimum 60mm/78mm
<b>Borehole diameter:</b>	typically 4 to 6 m/min
<b>Logging speed:</b>	
<b>Cable</b>	
<b>Cable type:</b>	mono, four-conductor, seven-conductor
<b>Digital data transmission:</b>	40 80Kbps per second depending on wireline
<b>Compatibility:</b>	ALTlogger – ALT ABOX- Mount Sopris Mgxll
<b>Sensors</b>	
<b>Transducers:</b>	ceramic piezoelectric with 20Khz (50mm) or 15 KHz (68mm) resonant frequency
<b>Number of Transmitters:</b>	1 or 2
<b>Number of receivers:</b>	2 to 8
<b>Spacing :</b>	variable All traces synchronously and simultaneously recorded
<b>Frequency of sonic wave:</b>	20KHz (50 mm) or 15 KHz (68 mm).
<b>Sonic wave sampling rate:</b>	Configurable, min. 2.0 µSec.
<b>Sonic wavelength:</b>	Configurable, up to 1024 samples per trace.
<b>Sonic wave dynamic range:</b>	12 bits plus configurable 4-position gain with AGC mode.

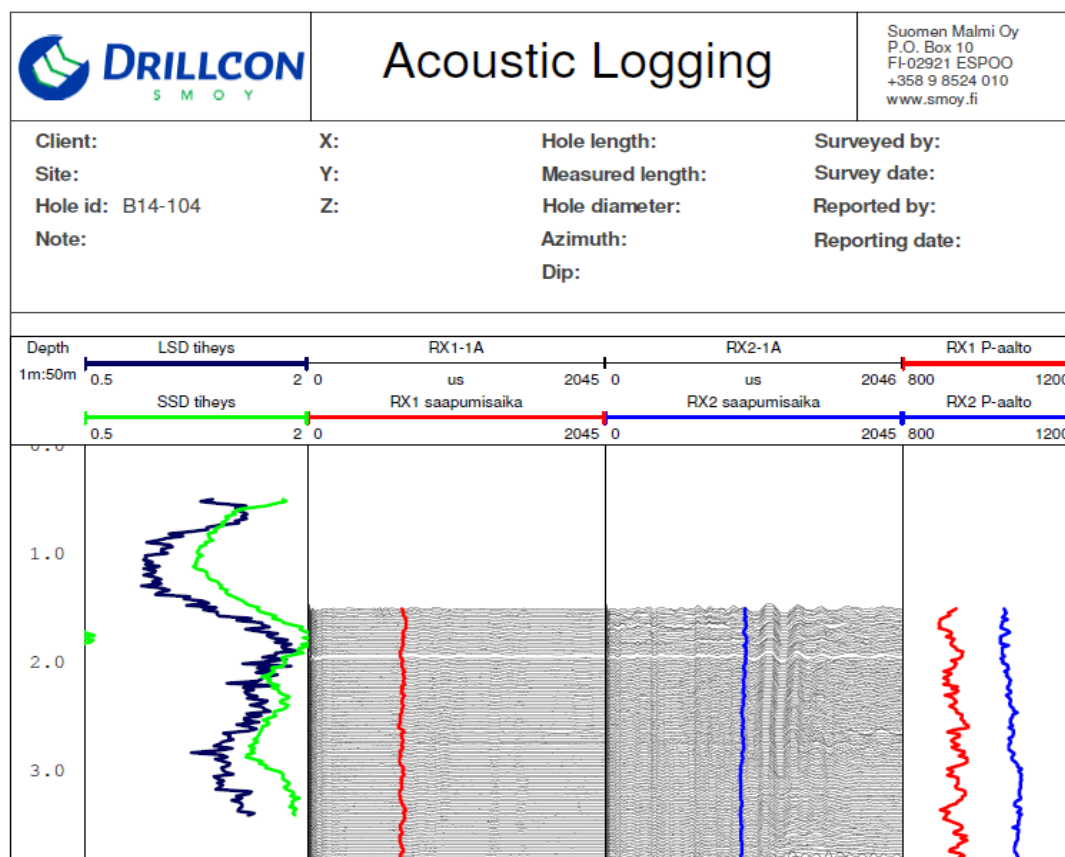
The specifications are not contractual and are subject to modification without notice.

Tyypillinen pilarikairaustulos Linnanpellon alueelta (Ramboll Oy).

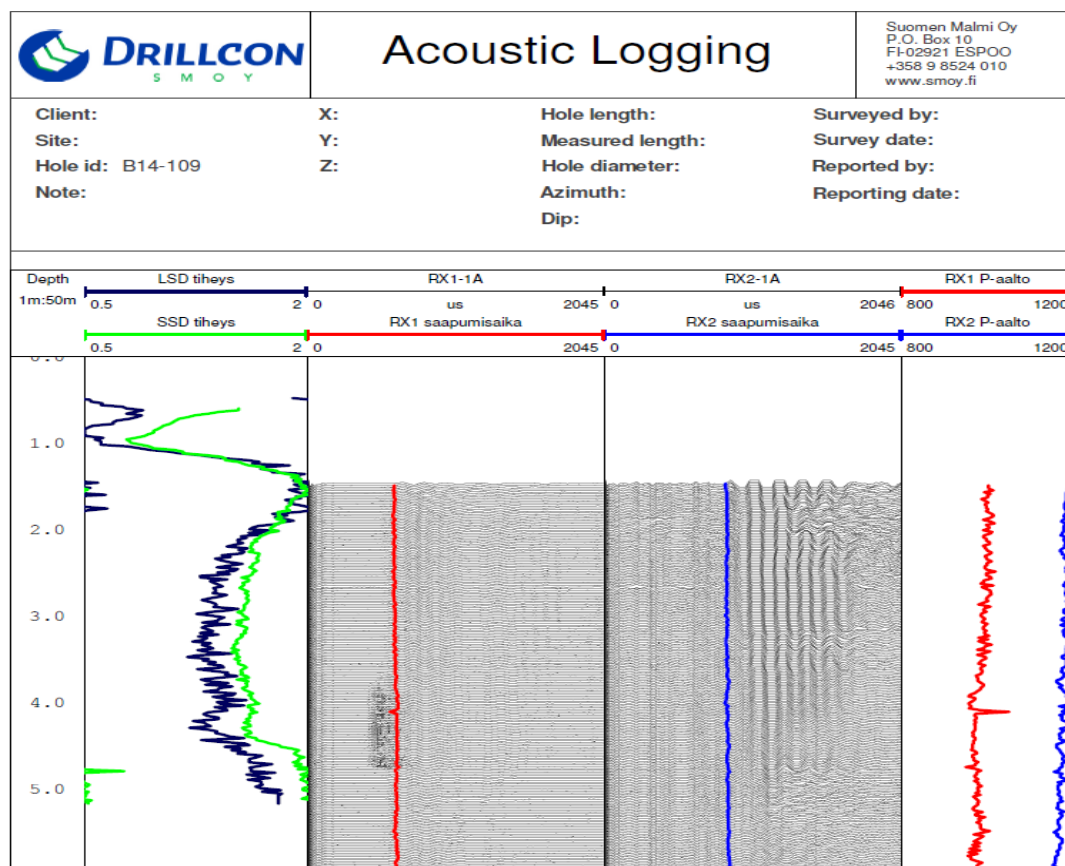




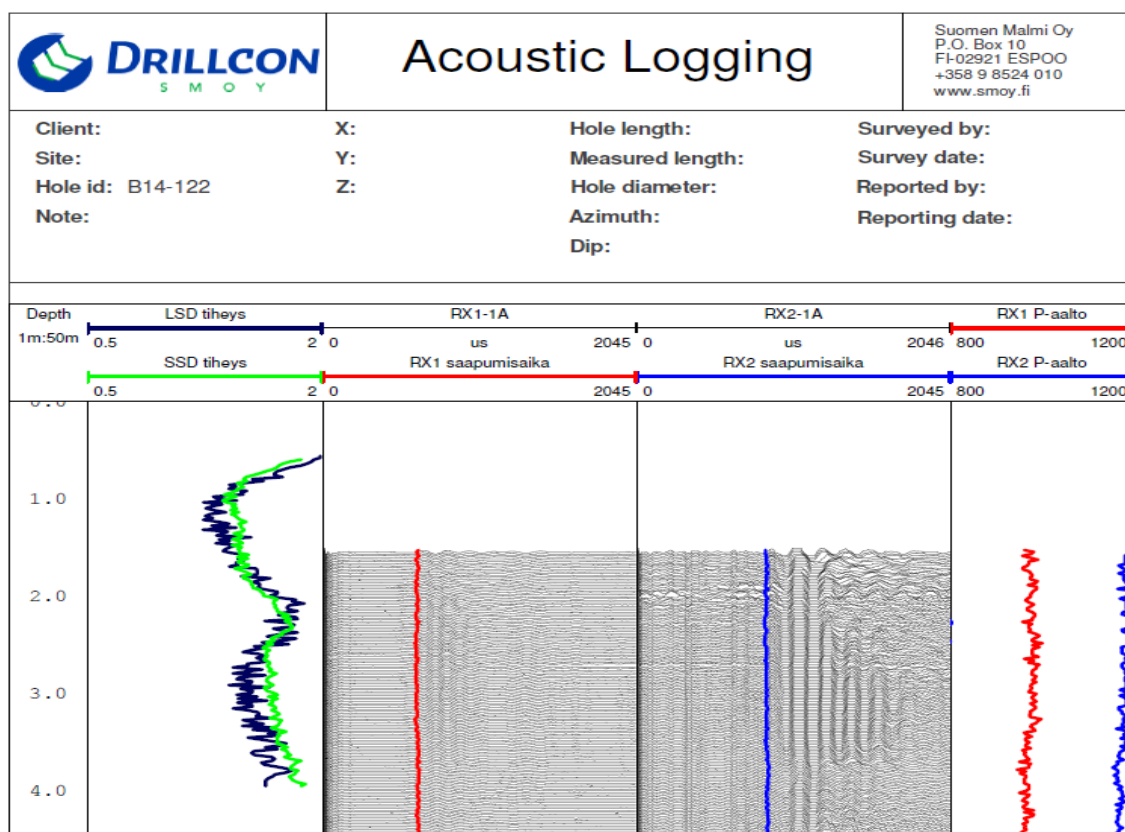
*Geofysikaalisten mittausten tulokset pilarista B14/104 (Tarvainen 2011).*



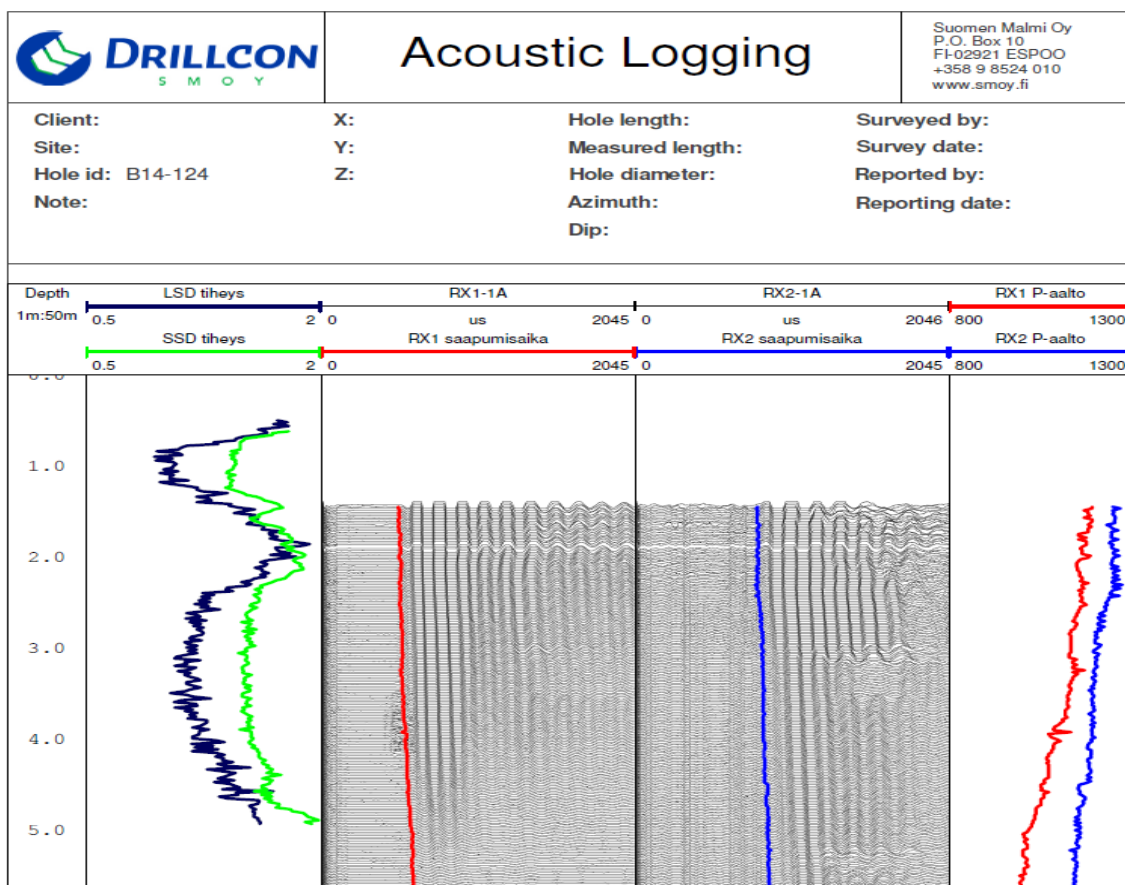
*Geofysikaalisten mittausten tulokset pilarista B14/109 (Tarvainen 2011).*



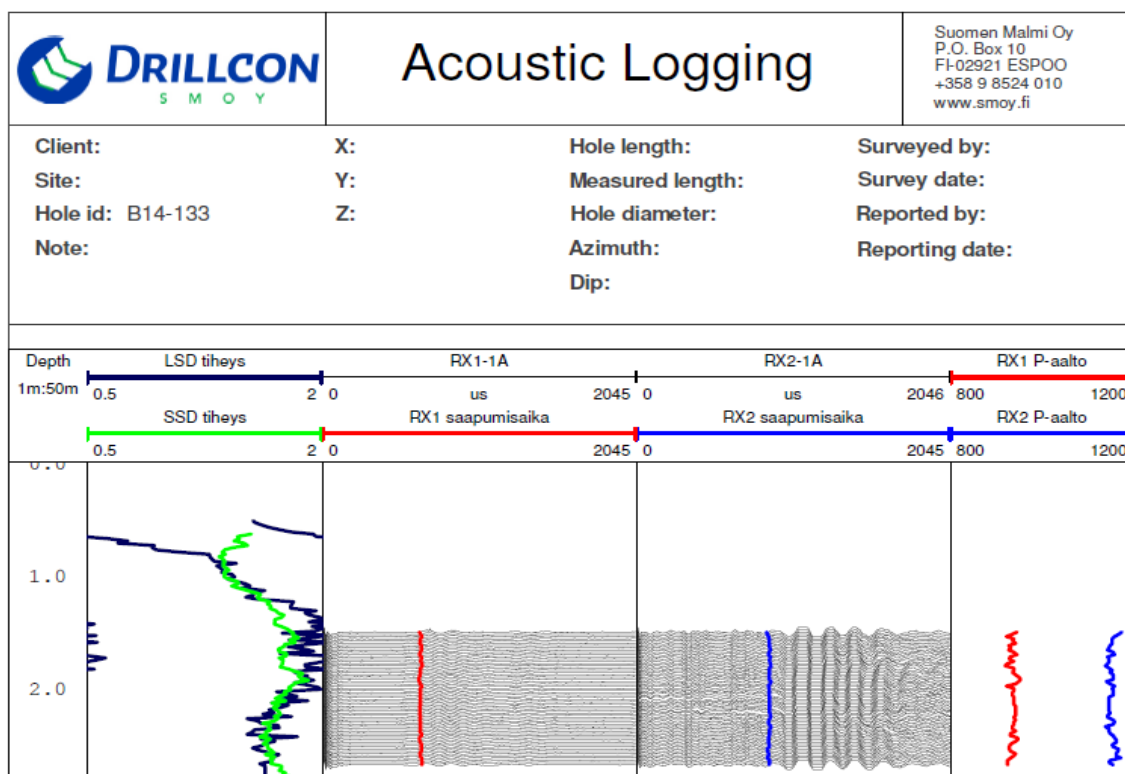
*Geofysikaalisten mittauksen tulokset pilarista B14/122 (Tarvainen 2011).*



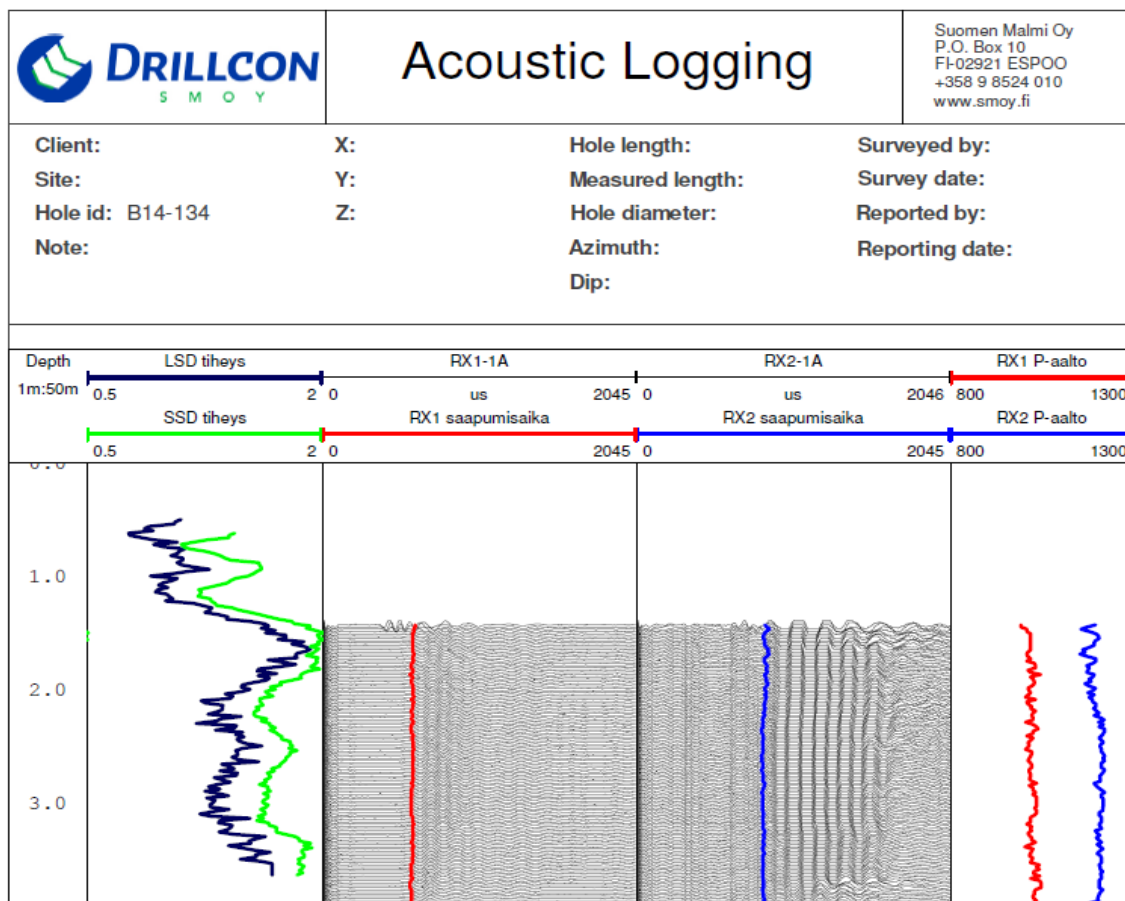
*Geofysikaalisten mittauksen tulokset pilarista B14/124 (Tarvainen 2011).*



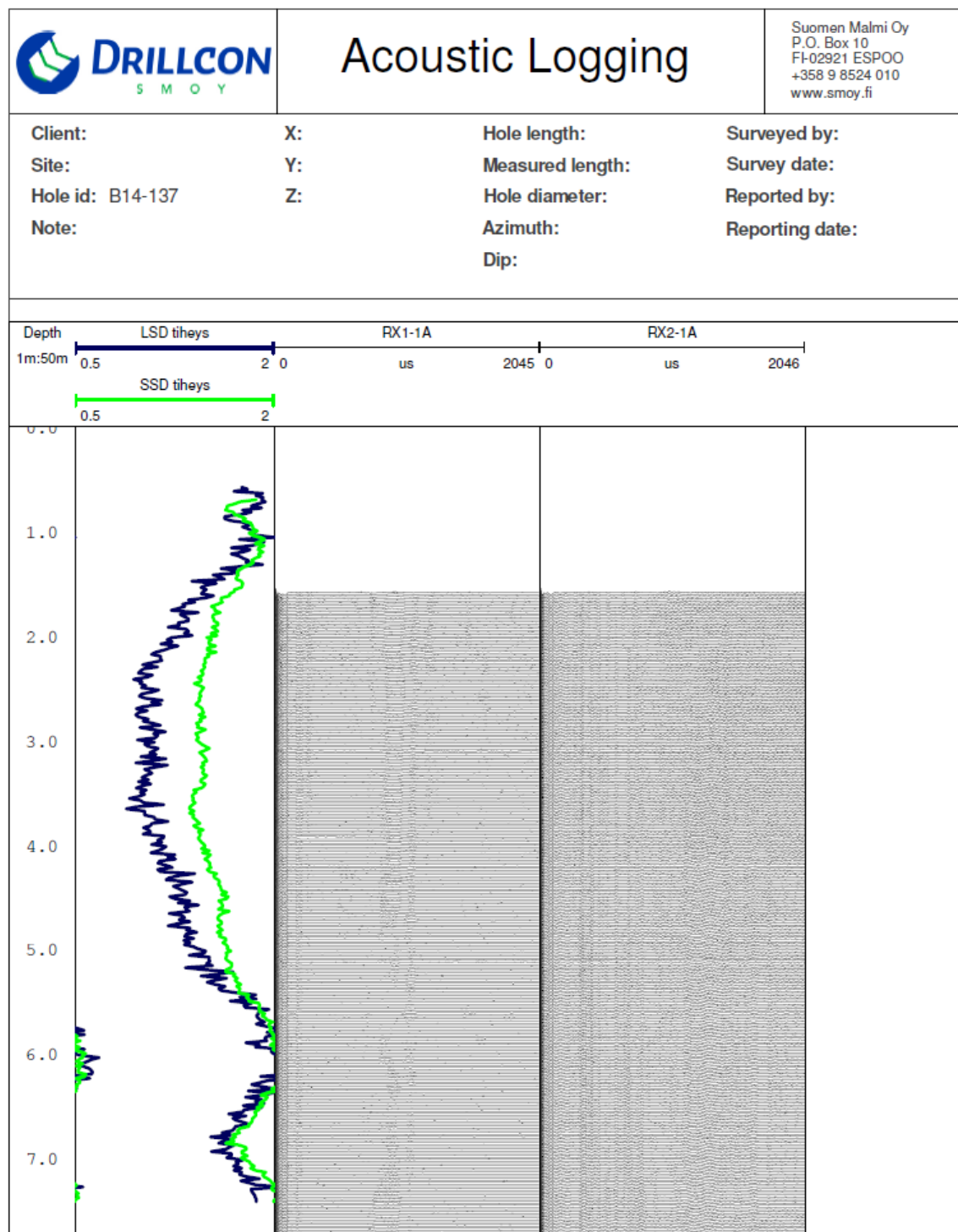
*Geofysikaalisten mittausten tulokset pilarista B14/133 (Tarvainen 2011).*



*Geofysikaalisten mittausten tulokset pilarista B14/134 (Tarvainen 2011).*

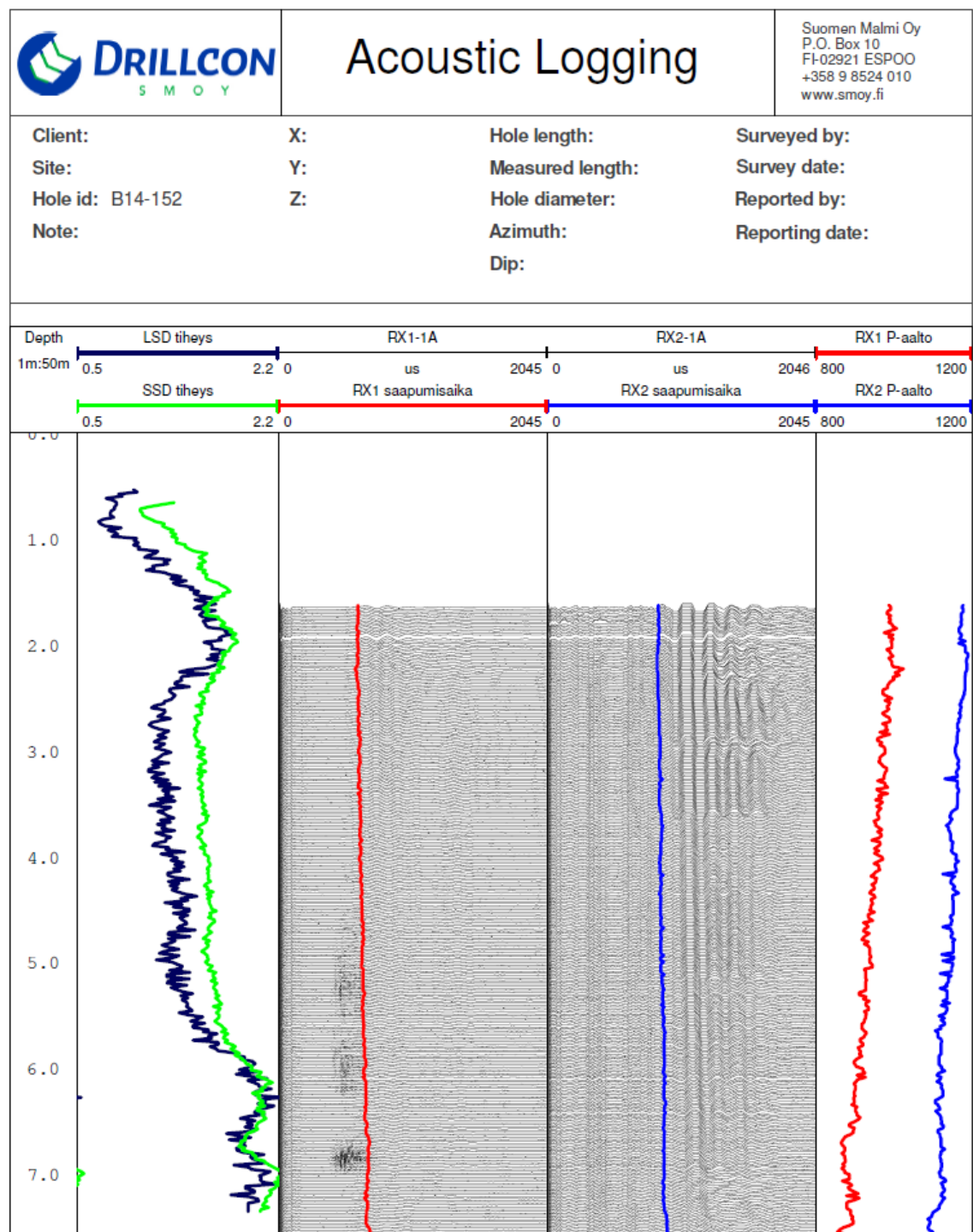


*Geofysikaalisten mittausten tulokset pilarista B14/137 (Tarvainen 2011).*

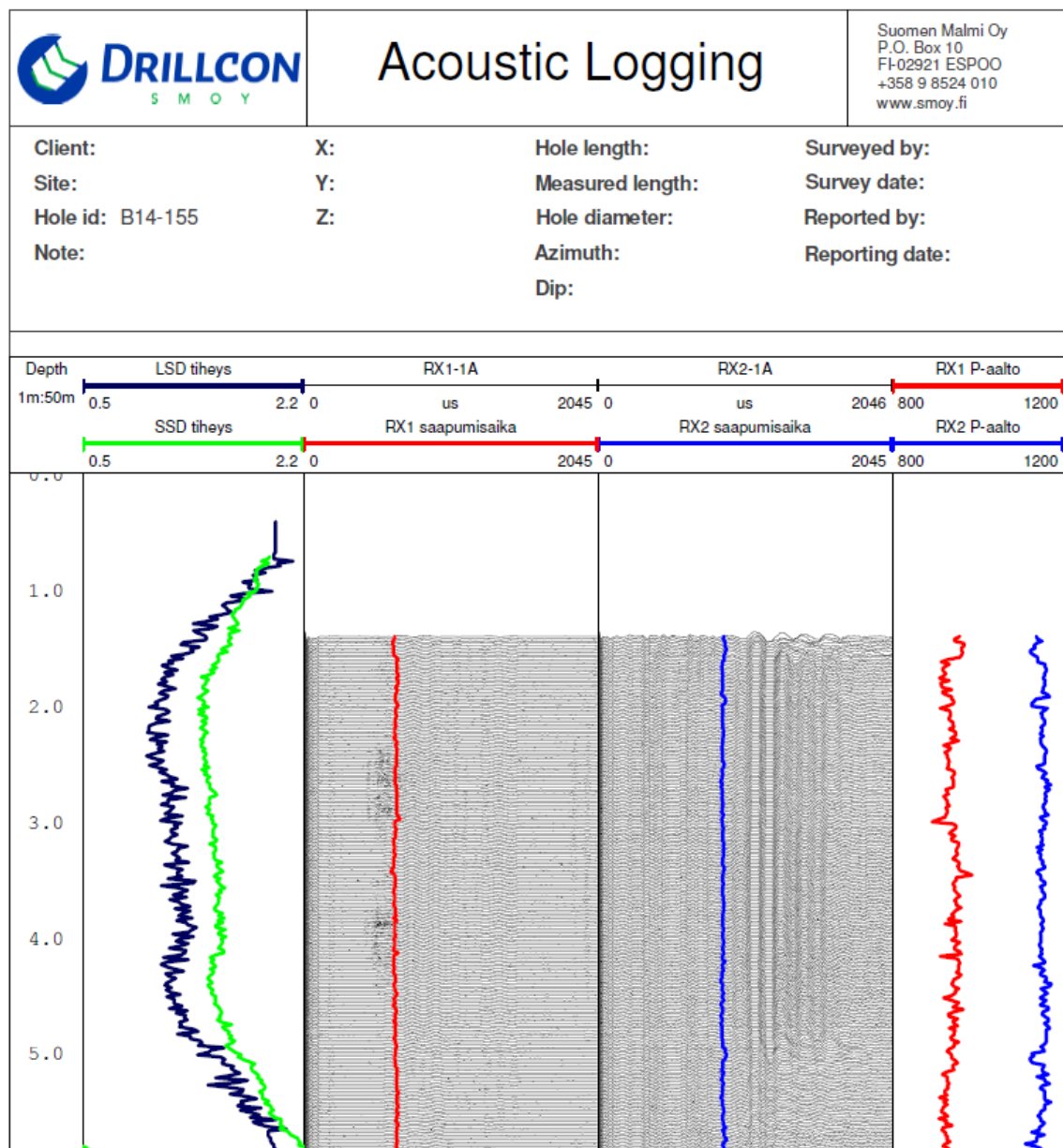




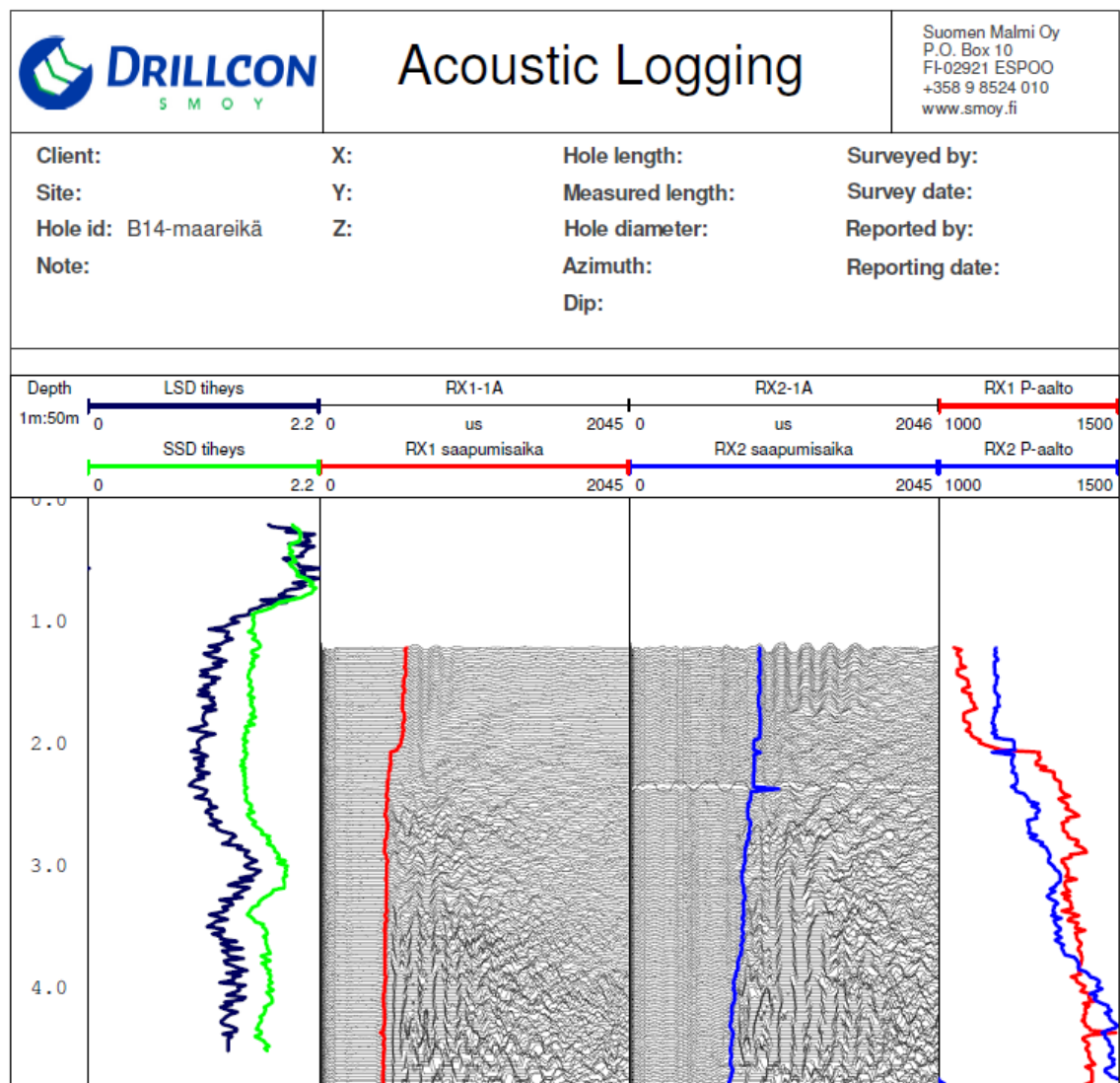
Geofysikaalisten mittausten tulokset pilarista B14/152 (Tarvainen 2011).



Geofysikaalisten mittausten tulokset pilarista B14/155 (Tarvainen 2011).



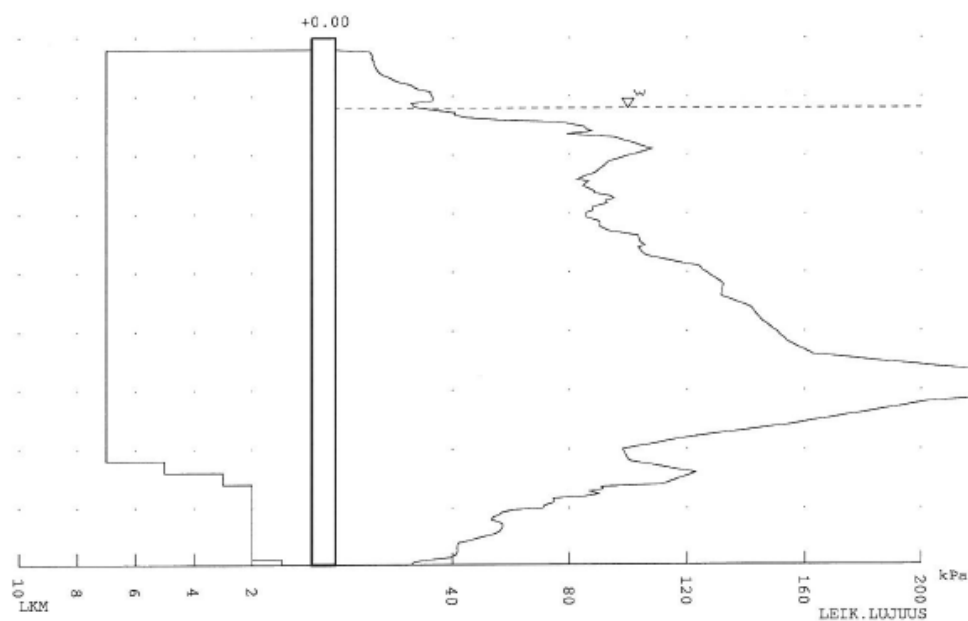
Geofysikaalisten mittausten tulokset maareistä (Tarvainen 2011).



Leikkauslujuuden keskiarvo reikämitatuissa pilareissa (Ramboll Oy).

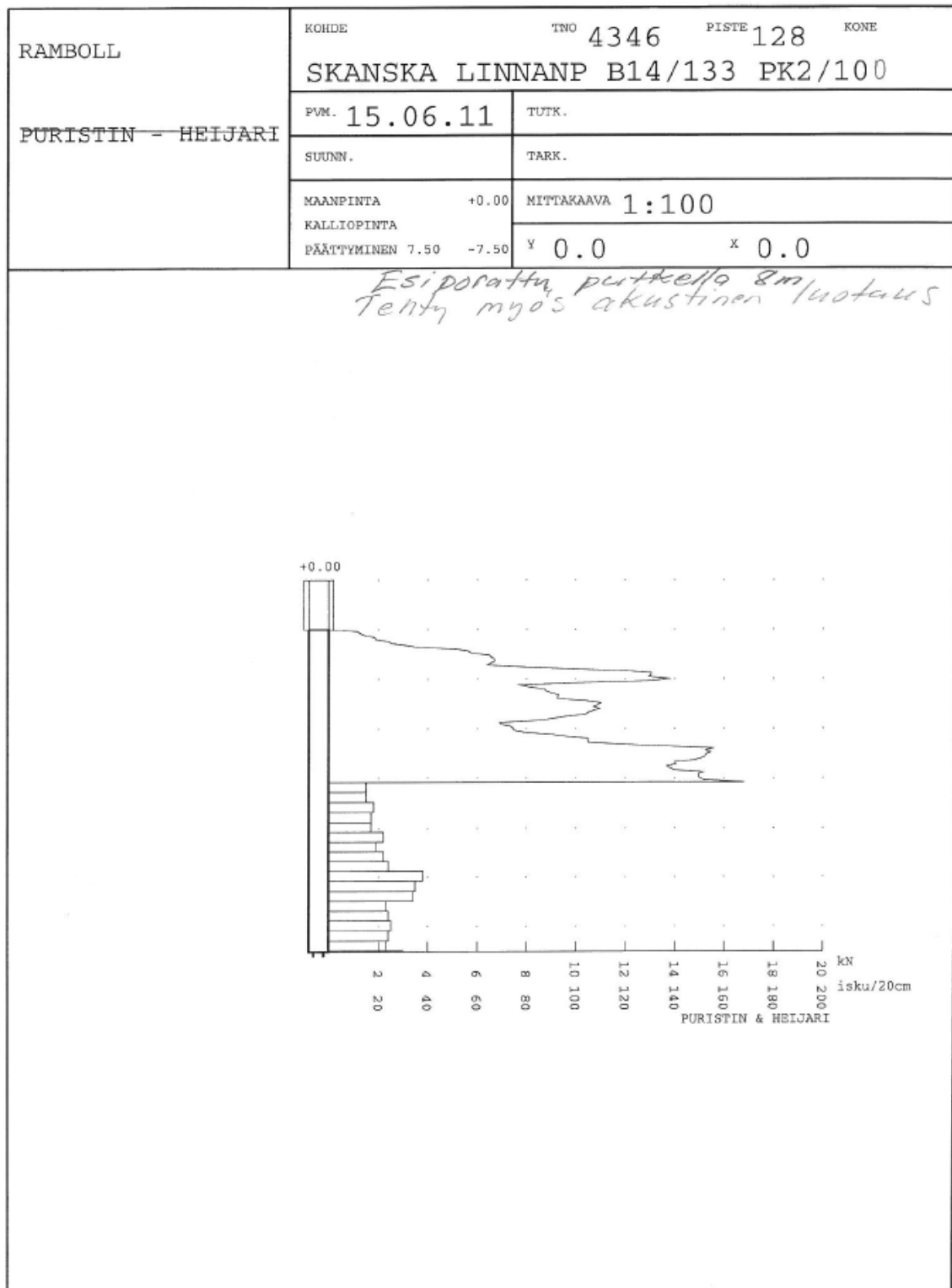
RAMBOLL  PURISTIN - HEIJARI N <sub>c</sub> 10 KESKIVARVO	KOHDE TNO 4346 PISTE 133 KONE SKANSKA LINNANP B14/124 PK2/100		
	PVM. 16.06.11	TUTK.	
	SUUNN.	TARK.	
		MITTAKAAVA 1:100	
		PISTEET 128 129 130 131 133 134 135	

*Esiporaattu putkella  
kaikista tentin myös  
akustinen luotaus*

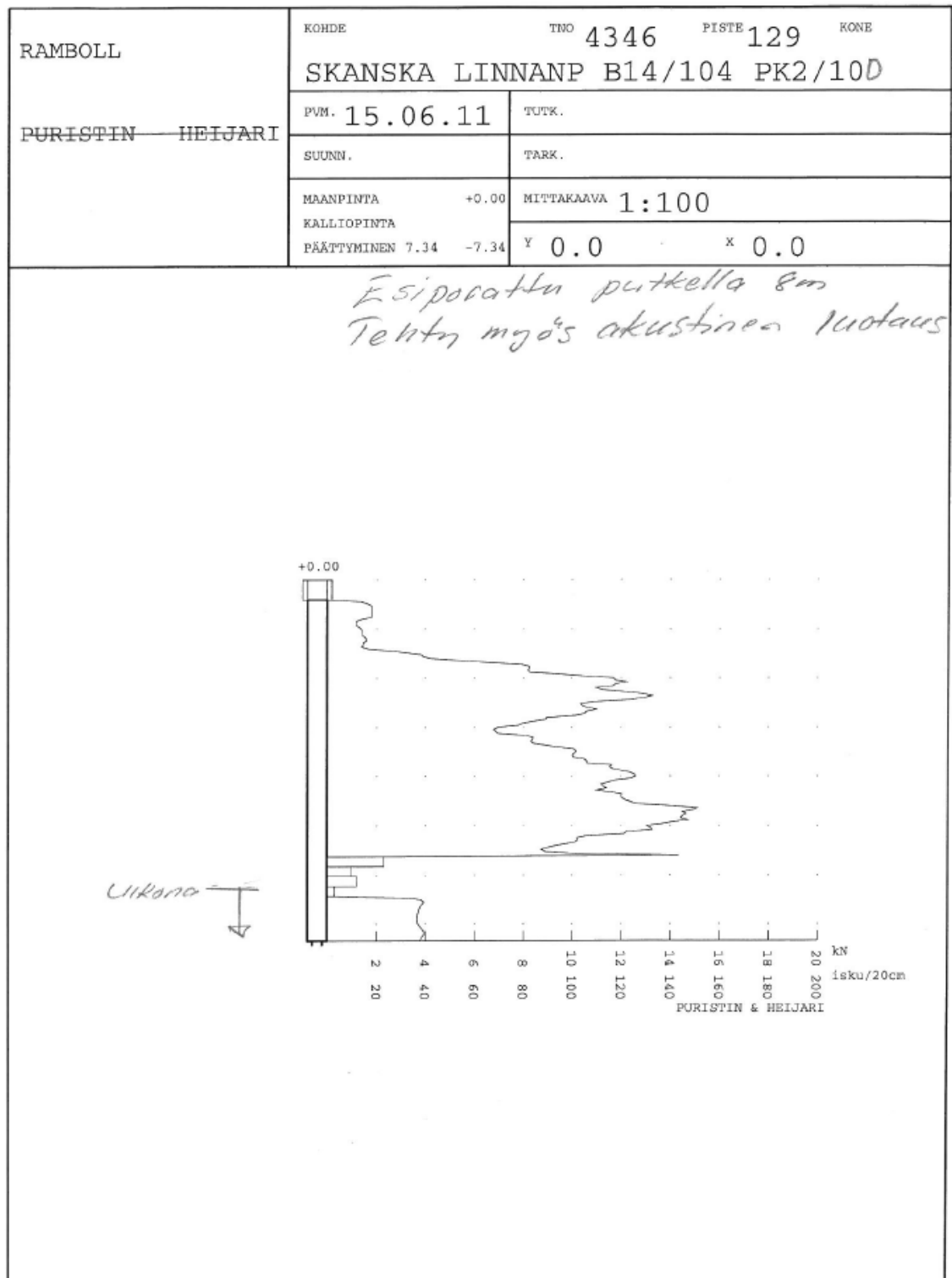




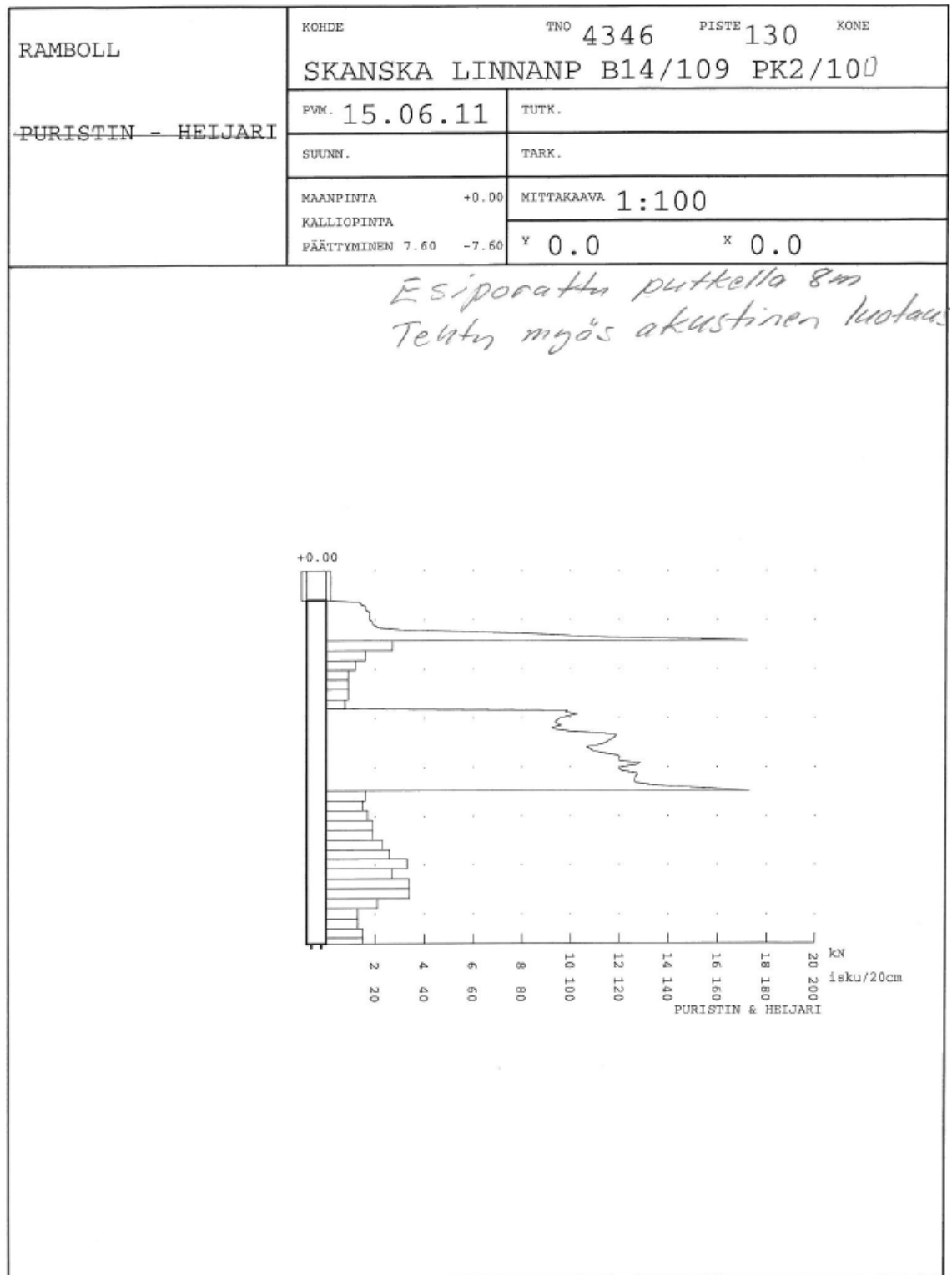
Kairausvastus reikämitatussa pilarissa B14/133 (Ramboll Oy).



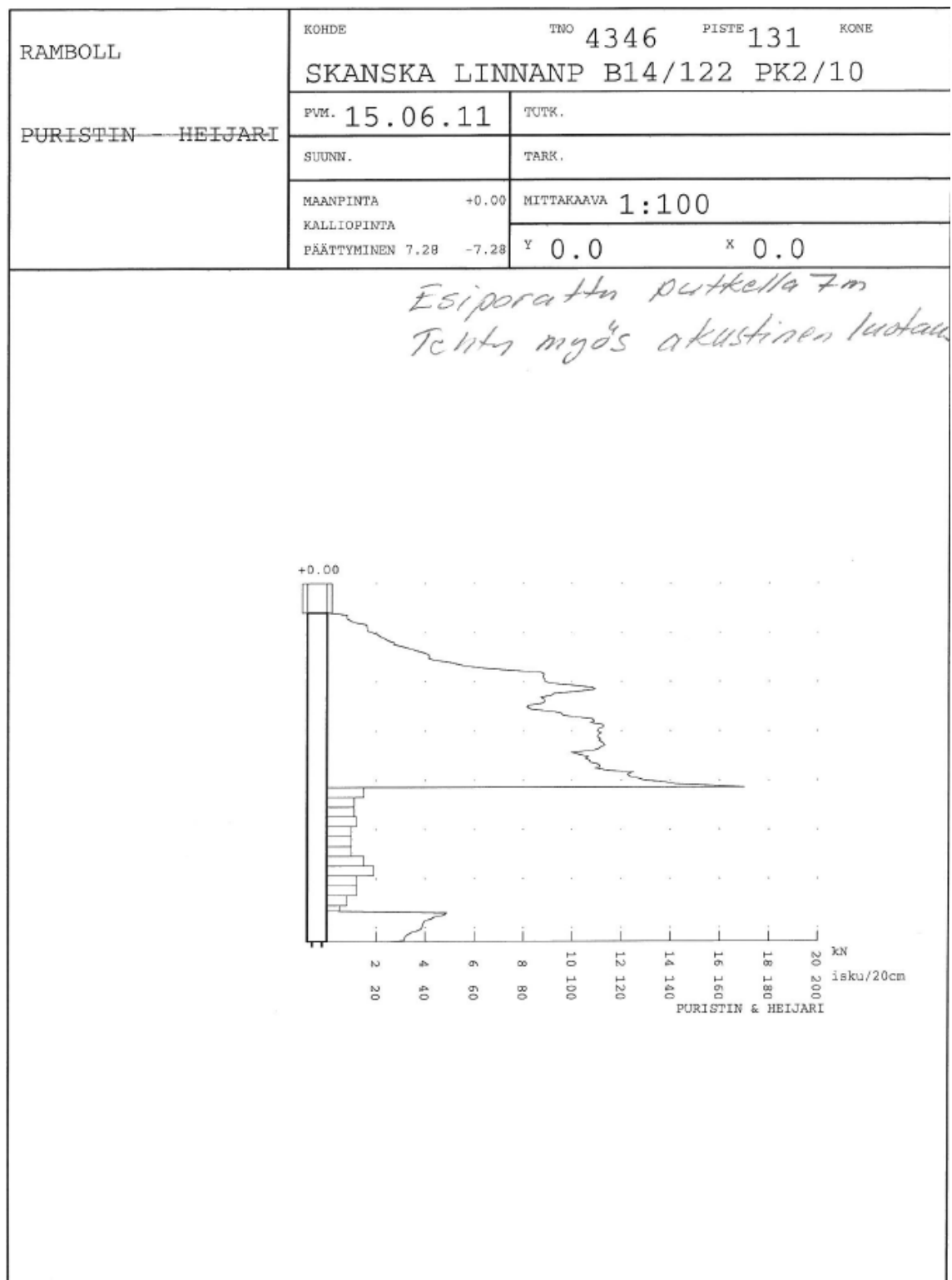
Kairausvastus reikämitatussa pilarissa B14/104 (Ramboll Oy).



Kairausvastus reikämitatussa pilarissa B14/109 (Ramboll Oy).



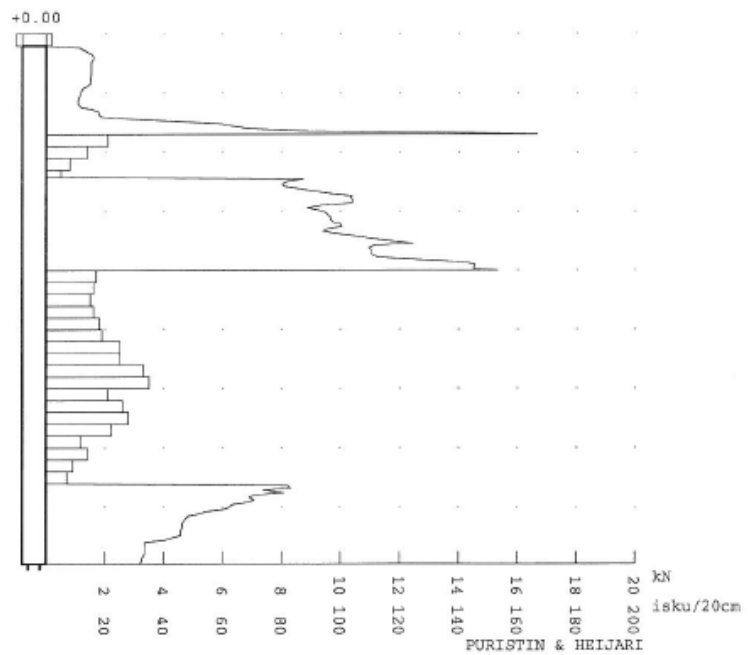
Kairausvastus reikämitatussa pilarissa B14/122 (Ramboll Oy).



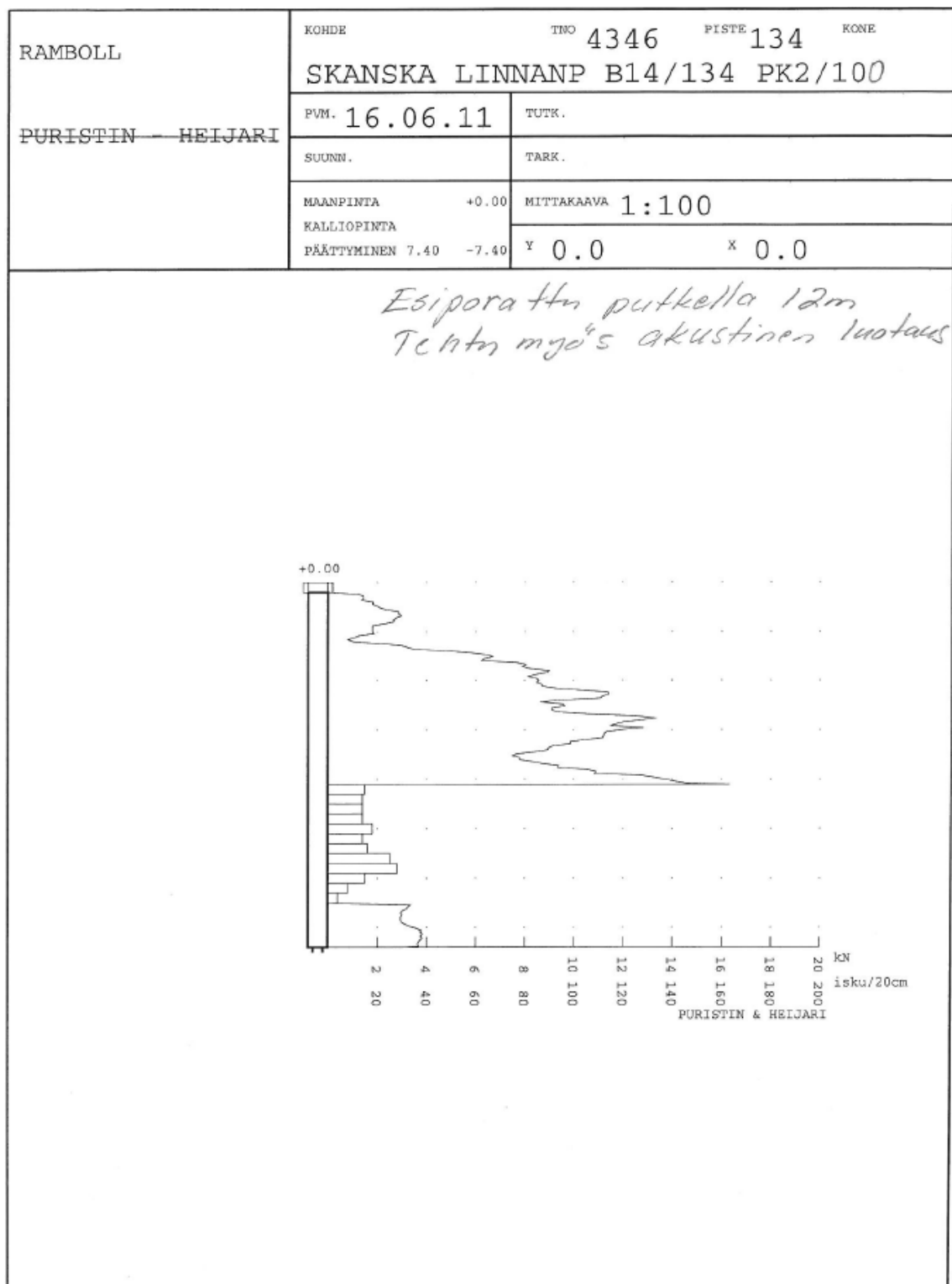
Kairausvastus reikämitatussa pilarissa B14/124 (Ramboll Oy).

RAMBOLL  PURISTIN - HEIJARI	KOHDEN TNO 4346 PISTE 133 KONE			
	SKANSKA LINNANP B14/124 PK2/100			
	PVM. 16.06.11		TUTK.	
	SUUNN.		TARK.	
	MAANPINTA +0.00		MITTAKAAVA 1:100	
	KALLIOPINTA			
	PÄÄTTYMINEN 8.96 -8.96		Y 0.0 X 0.0	

*Esiporattu pitkellä 12m  
Tehtä myös akustinen luotau*



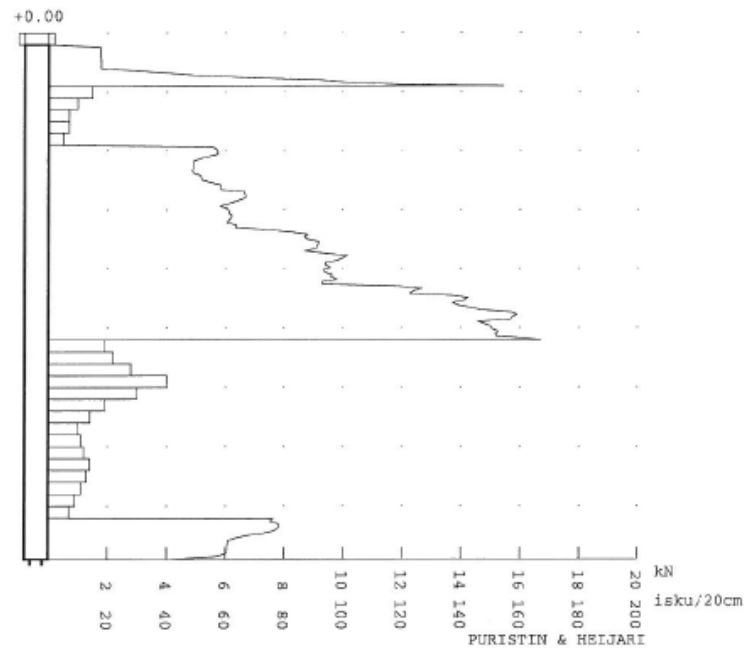
Kairausvastus reikämitatussa pilarissa B14/134 (Ramboll Oy).



*Kairausvastus reikämitatussa pilarissa B14/155 (Ramboll Oy).*

RAMBOLL  <del>PURISTIN - HEIJARI</del>	KOHDE TNO 4346 PISTE 135 KONE SKANSKA LINNANP B14/155 PK2/100	
	PVM. 16.06.11	TUTK.
	SUUNN.	TARK.
	MAANPINTA +0.00 KALLIOPINTA PÄÄTTYMINEN 8.90 -8.90	MITTAKAAVA 1:100 Y 0.0 X 0.0

Esiporaattu putkella 12m  
Tehty myös akustinen luotaus



Kairausvastus reikämitatussa maareiässä (Ramboll Oy).

